

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrstelematik
Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

Studienarbeit

Optimierung der Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen mithilfe von V2X Technologien

eingereicht von
Herrn Willi Schmidt
geboren am 16. Januar 1993 in Freiberg

verantwortlicher Hochschullehrer: Herr Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Mario Krumnow (TU Dresden)
Herr Dr.-Ing. Robert Oertel (DLR e.V. Berlin)

Dresden, 21. Juni 2018

Bibliografischer Nachweis

Willi Schmidt

Optimierung der Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen mithilfe von V2X Technologien

Studienarbeit, Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

41 Seiten, 16 Abbildungen, 2 Tabellen, 24 Quellen

Anhang: 8 Seiten, 1 Abbildung, 2 Tabellen, 0 Quellen

Autorenreferat

Seit mehr als 30 Jahren wird an Systemen zur Bevorrechtigung von Einsatzkräften der Feuerwehr, Polizei und des Rettungsdienstes an Lichtsignalanlagen entwickelt. Diese Systeme bringen den Einsatzkräften, die Menschenleben retten und schwere gesundheitliche Schäden abwenden, nicht nur eine Zeitersparnis bei der Anfahrt zum Einsatzort, sondern sollen auch Unfälle mit anderen Verkehrsteilnehmer verhindern. Deshalb beschäftigt sich das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. im Rahmen des Forschungsvorhabens „HALI Berlin“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur mit dieser Problemstellung. Inhalt dieser Arbeit ist nun die Optimierung eines Verfahrens zur Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen. Dabei wird insbesondere Wert auf die Bestimmung des optimalen Anmeldezeitpunkts an der Lichtsignalanlage und auf den Vorgang der eigentlichen Anmeldung gelegt. Dazu soll unter anderem die aktuelle Verkehrslage mit in den Anmeldevorgang einfließen. So soll es erstmalig möglich sein, dass der Rückstau vor der Lichtsignalanlage bereits bei Ankunft der Einsatzkräfte abgeflossen ist. Zur Validierung der berechneten Schaltzeitpunkte wird die Verkehrsmikrosimulationssoftware SUMO eingesetzt. Da das Verfahren später im Testgebiet Berlin Moabit eingesetzt werden soll, wurden mehrere Laborversuche an realen LSA-Steuergeräten durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden Projekt „HALI Berlin“ genutzt.

Thesen

1. Ein System zur Einsatzwagenbevorrechtigung ersetzt kein Sonder- und Wegerecht.
2. Bestehende Systeme zur Einsatzwagenbevorrechtigung nutzen nicht alle Möglichkeiten aus.
3. Es ist nicht einfach, die Prämissen aller Beteiligten an einem Knotenpunkt zu vereinen, ein Kompromiss ist aber möglich.
4. Bei den Planungen zur Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen sind die verkehrlichen Besonderheiten einer jeden Stadt gesondert zu beachten.
5. Eine Simulation kann Fehler eines Algorithmus aufdecken.
6. Laborversuche vor der Einführung im Testfeld sind unerlässlich.
7. Mit den Ergebnissen eines Laborversuchs sollte eine vorher durchgeführte Simulation immer erneut durchgeführt werden.

Inhaltsübersicht

Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einführung	1
2 Grundlagen der Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen	3
2.1 Bestandssysteme	3
2.1.1 SIEMENS Sitraffic STREAM	3
2.1.2 GreenWaySystems Traffic Green	4
2.1.3 Stührenberg STGPS Free Way	5
2.1.4 GTT OPTICOM Emergency Response	6
2.2 Zusammenfassung	6
2.3 HALI Berlin	7
2.4 Prädiktion von Schaltzeiten	9
3 Konzept und Umsetzung einer optimierten Einsatzwagenbevorrechtigung	11
3.1 Konzeptentwurf	11
3.2 Berechnung von Signallaufzeiten anhand eines Festzeitplans	13
3.3 Berechnung des Anmeldezeitpunkts anhand der Signallaufzeiten	15
3.3.1 Algorithmus	15
3.3.2 Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation	16
3.4 Simulationsstudie	17
3.4.1 Vorbereitungen	17
3.4.2 Simulation von Anmeldezeitpunkten	21
3.5 Laborversuch	23
3.5.1 Versuchsaufbau	23
3.5.2 Ansteuerung LSA-Steuergerät	24
3.5.3 Validierung der berechneten Schaltzeitpunkte	25
4 Analyse und Auswertung	27
4.1 Simulationsanalyse	27
4.2 Analyse und Auswertung der technischen Gegebenheiten	28
4.3 Analyse und Auswertung der ermittelten Signallaufzeiten	29
4.4 Vergleich der berechneten und gemessenen Signallaufzeiten	32
4.5 Analyse zu auftretenden Latenzen bei der Datenübertragung	33

5 Zusammenfassung und Ausblick	35
Literatur	37
Anhang	43

Abkürzungsverzeichnis

Anfo	Anforderung
API	Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (engl. application programming interface)
BFD-Kopfstecker	Anschlussbuchsen für Ein- und Ausgänge über Flachbandkabel
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BÜSTRA	Bahnübergangssteuerungsanlagen
DLK	Drehleiter mit Korb
ELZ	Einsatzleitzentrale (Polizei)
EWA	Einsatzwagen (Fahrzeuge der Streifenpolizei)
FUP-Platter	Erweiterungskarten für LSA-Steuergeräte zum Anschluss von Taster für Fußgänger
GPS	Global Positioning System
IPC	Industrie Personal Computer
IV	Individualverkehr
LHF	Lösch- und Hilfeleistungsfahrzeug
LSA	Lichtsignalanlage
LST	Leitstelle (Feuerwehr)
NEF	Notarzteinsatzfahrzeug
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PRS	Public Regulated Service
RTW	Rettungswagen
SEF	Sondereinsatzfahrzeug
SUMO	Simulation of Urban Mobility
SZPL	Signalzeitplan

1 Einführung

Das Mobilitätsbedürfnis steigt stetig an [Bun14] - damit einhergehend auch die Verkehrsbelastung [Bun16]. Gerade in Großstädten sind Staus und Unfälle deshalb an der Tagesordnung. Dabei ist es nicht selten, dass auch Fahrzeuge von Feuerwehr, Polizei und Rettungsdienst, sogenannte Sondereinsatzfahrzeuge, an Unfällen beteiligt sind. Besondere Tragik daran: In den meisten Fällen sind sie unterwegs, „[...] um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden [...]“ [Rot89]. Aber auch Staus können die Fahrzeit zum Einsatzort erheblich verlängern.

Besonders die Fahrer der Einsatzfahrzeuge stehen deshalb unter großem Stress: Einerseits wollen sie schnell zur Einsatzstelle kommen, auf der anderen Seite hat die Sicherheit höchste Priorität, um nicht selbst Rettungskräfte zu benötigen. In den meisten deutschen Bundesländern ist zudem eine Hilfsfrist in den Landesrettungsdienstgesetzen festgeschrieben. Diese Zeit variiert zwischen fünf und fünfzehn Minuten und besteht neben Gesprächs-, Dispositions- und der Ausrückezeit fast ausschließlich aus der Anfahrtszeit. Eine Studie des Bundesamtes für Straßenwesen (BAST) [Boc07] ermittelte schon im Jahr 1995, dass bei Einsatzfahrten im Vergleich zu übrigen Verkehrsteilnehmern ein achtfach höheres Risiko besteht, an einem Unfall mit Schwerverletzten beteiligt zu sein.

Davon ausgehend stellt sich die Frage, wie man Einsatzfahrzeuge trotz voller Straßen sicher und schnell zum Einsatzort führen kann. Der Blick fällt dabei auf Lichtsignalanlagen als die Stellschraube im Verkehrsmanagement. Durch Unterstützung der Lichtsignalanlagen ist es denkbar, den Einsatzkräften eine „Grüne Welle“ zum Einsatzort zu verschaffen. Die Idee ist nicht gänzlich neu, so gibt es bereits seit mehr als 20 Jahren diverse Systeme. Bei der näheren Betrachtung dieser fällt jedoch auf, dass es nach wie vor Defizite gibt, die mittels neuer technologischer Möglichkeiten beseitigt werden können. So sind diese Systeme bisher an starre Anmeldepunkte gebunden und können nicht auf aktuelle Verkehrssituationen reagieren.

Auch das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Berlin Adlershof hat sich dieser Thematik im Rahmen des Forschungsprojektes „HALI Berlin“ angenommen. Ziel des Projektes ist es, ein revolutionäres Bevorrechtigungssystem für die Einsatzkräfte der Feuerwehr, des Rettungsdienstes und der Polizei Berlin zu erschaffen. Dabei soll unter anderem eine zeitlich besonders genaue Ansteuerung der Lichtsignalanlagen erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ansätze bestehender Bevorrechtigungssysteme für Sondereinsatzfahrzeuge der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) aufzugreifen und diese um ein dynamisches Anmeldeverfahren an Kreuzungen zu erweitern. Dieses Verfah-

ren soll Einsatzfahrzeugen eine ungehinderte Durchfahrt verschaffen und die Auswirkungen auf den Individualverkehr und den öffentlichen Personennahverkehr so gering wie möglich halten. Im ersten Kapitel erhält man neben einem Einblick in Funktionen ausgewählter bestehender Bevorrechtigungssysteme und der Erläuterung des Forschungsprojektes „HALI Berlin“ auch Grundlagen zu bestehenden Verfahren der Signalzeitprädiktion. Im folgenden Kapitel wird ein Konzept zur Ermittlung eines optimalen Anmeldezeitpunkts aufgestellt. In der Folge wird die Berechnung des Anmeldeverfahrens genauer erläutert, bevor im dritten Kapitel die Anmeldung der Einsatzfahrzeuge sowohl in einer Simulationsumgebung als auch in Laborversuchen validiert wird. Im letzten Kapitel erfolgt die Analyse und Auswertung der Simulation sowie der Laborversuche. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick. Die Ergebnisse dieser Arbeit fließen direkt ins Projekt „HALI Berlin“ ein.

Bei Mitfahrten in einem Rettungswagen sowie einem Lösch- und Hilfeleistungsfahrzeug der Feuerwehr Berlin konnte sehr eindrucksvoll beobachtet werden, wie oft es in einer 12-Stunden-Schicht zu gefährlichen Situationen auf der Fahrt zur Einsatzstelle kommt. Insbesondere wenn das Sondereinsatzfahrzeug mit eingeschaltetem Martinshorn auf eine Kreuzung mit „rot“ zeigenden Signalgebern fährt, scheinen viele Verkehrsteilnehmer hilflos und verfallen im schlimmsten Fall in eine Schockstarre. An dieser Stelle muss dringend mit Hilfe technischer Möglichkeiten Abhilfe geschaffen werden.

2 Grundlagen der Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen

In diesem Kapitel soll ein Überblick gegeben werden, welche Systeme es zur Zeit zur Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen gibt. In der Folge werden Punkte aufgezeigt, die an den Bestandssystemen als verbesserungswürdig angesehen werden. Diese werden im Projekt „HALI Berlin“ umgesetzt. Dafür spielt die Prädiktion von Schaltzeiten eine wesentliche Rolle, weshalb auf bestehende Ansätze eingegangen wird.

2.1 Bestandssysteme

Es ist seit vielen Jahren möglich, bestimmte Verkehrsteilnehmer an Lichtsignalanlagen bevorzugt zu behandeln. Dabei ist es zum Beispiel üblich, dass Fahrzeuge des ÖPNV bevorrechtigt werden, damit sie ihren Fahrplan einhalten können. In vielen Städten wird dieses Verfahren auch eingesetzt, um den ÖPNV attraktiver zu gestalten. Aber auch für Fahrzeuge der BOS wie Feuerwehr, Polizei oder Rettungsdienst gibt es bereits Systeme zur Vorrangschaltung. Hauptsächliches Ziel dieser Systeme ist, es die Fahrzeiten zu verkürzen. Für Sondereinsatzfahrzeuge, die zur Erfüllung von hoheitlichen Aufgaben mit Blaulicht und Martinshorn unterwegs sind, bringen sie aber auch einen erheblichen Sicherheitsgewinn, da keine kreuzenden Verkehrsströme erwartet werden müssen. Ausgewählte Systeme zur Einsatzfahrzeugbevorrechtigung werden in den kommenden Abschnitten näher betrachtet.

2.1.1 SIEMENS Sitraffic STREAM

Die Firma SIEMENS AG bietet ein Bevorrechtigungssystem für ÖPNV und Fahrzeuge der Feuerwehr unter dem Namen Sitraffic Stream [SIE14] an. Nach eigenen Angaben muss hierbei eine so genannte On-Board-Unit (OBU), bestehend aus GPS-Empfänger und GPRS Kommunikationseinheit, im Fahrzeug verbaut werden. Wenn das Fahrzeug auf der Fahrt zum Einsatzort einen virtuell hinterlegten Voranmeldepunkt überfährt, registriert dies die OBU und sendet einen Befehl mit Fahrzeugidentifikationsnummer und Fahrtrichtung an den Verkehrsrechner SIEMENS Sitraffic Scala. Dieser startet eine Bevorrechtigung am Steuergerät der entsprechenden Kreuzung. Dies wird mit einem Signalgeber mit Buchstabenscheibe „F“ an der LSA signalisiert. Mittels Hauptanmeldepunkt wird die Zeitdauer bis zur Überfahrt des Feuerwehrfahrzeuges nochmal präzisiert. Nach der Überfahrt des Knotenpunktes erreicht das Fahrzeug den Abmeldepunkt. Auch hier sendet die OBU wieder einen Befehl an den Verkehrsrechner, welcher die Bevorrechtigung beendet und sofort wieder in das vorhergehende

Signalprogramm schaltet. Das System ist nicht an feste Routen gebunden, sondern erlaubt kreuzungsbezogene Bevorrechtigungen.

Die Vorteile des Systems sind, dass keine baulichen Veränderungen an den Kreuzungen vorgenommen werden müssen, vorausgesetzt, es wird bereits ein Steuergerät der Version Sitraffic C9xx eingesetzt. Weiterhin ist keine zusätzliche Kommunikationsinfrastruktur notwendig, da die bereits bestehende Verbindung zum Verkehrsrechner über Kabel oder Mobilfunk genutzt werden kann. Voraussetzung hierbei ist allerdings der Einsatz des Verkehrsrechners Sitraffic Scala. Nachteil des Systems ist, dass nur Steuergeräte von SIEMENS angesteuert werden können. Eine Bevorrechtigung mit Steuergeräten wie zum Beispiel von Stühnberg oder Swarco ist nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Wenn ein Verkehrsrechner von SIEMENS vorhanden ist und die meisten Lichtsignalanlagen auch mit SIEMENS Steuergeräten der neueren Generation ausgestattet sind, ist es sicher sinnvoll, dieses System durch Sitraffic Stream um eine Feuerwehrbevorrechtigung zu erweitern. Da hierbei allerdings nie das Ziel der Einsatzfahrzeuge bekannt ist, kann auch immer nur an der nächstfolgenden LSA die Feuerwehrbevorrechtigung gestartet werden, eine Vorausplanung ist nicht möglich. Weiterhin ist es in jedem Fall erforderlich, dass die komplette Zufahrt eine Freigabe erhält - dieses Vorgehen muss aufgrund der Belastung des IV in Frage gestellt werden. Das System wird zum Beispiel durch die Feuerwehr der Stadt Böblingen (Baden-Württemberg) genutzt.

2.1.2 GreenWaySystems Traffic Green

Die Firma Green Way Systems GmbH mit Sitz in Frankfurt (Oder) hat im Jahr 1996 mit der Entwicklung eines Bevorrechtigungssystems für Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr und des Rettungsdienstes begonnen (siehe auch: „Gesprächsprotokoll Greenwaysystems Frankfurt/Oder“ Seite A - 3 und [Gre18]). Dabei wurde an 35 Lichtsignalanlagen ein zusätzlicher Schaltschrank aufgestellt. Dieser beinhaltet neben einer Funkeinheit von Bosch einen Umsetzer für die Ansteuerung von 9 potentialfreien Kontakten. Von einer weiteren BOSCH-Funkeinheit im Fahrzeug werden über eine Frequenz im 70-cm Band mit 1 Watt Sendeleistung über ein offenes Protokoll die Anlagen selektiv angesprochen und eine An- oder Abmeldung ausgelöst. Im Fahrzeug selbst ist neben dem Funkgerät noch ein Bordrechner mit GPS-Modul verbaut. Dieser bestimmt aufgrund der aktuellen Position des Fahrzeugs, welche Lichtsignalanlagen eine Voranmeldung, eine Hauptanmeldung oder eine Abmeldung bekommen sollen. Zur Identifikation wird eine intern hinterlegte Karte benutzt. Sobald der Fahrer des Einsatzfahrzeugs das Blaulicht aktiviert, wird auch die Verbindung zwischen Bordrechner und Funkgerät freigegeben, sodass die Anforderungen gesendet werden können. Auf der Mitte der Kreuzung wird die Abmeldung an das Steuergerät gesendet. Zur Sicherheit wird nach 120 Sekunden eine Zwangsabmeldung durchgeführt. Die komplette Steuerung, wie die Nutzung von Phasen oder Sondereingriffsplänen, die Überwachung von Fahrten im Zugverband oder sich überschneidende Bevorrechtigungen wird nicht von Greenwaysystems übernommen und muss extern an ein Planungsbüro vergeben werden. An den LSA in Frankfurt (Oder) wird nach

dem FIFO-Prinzip gearbeitet. Das Fahrzeug, welches zuerst die Anmeldung sendet, erhält die Freigabe. Im Bordrechner der Einsatzfahrzeuge sind feste Vor- und Hauptanmeldepunkt einprogrammiert, eine dynamische Anpassung, wie zum Beispiel aufgrund der aktuellen Verkehrslage oder von Rückstau vor LSA wird nicht vorgenommen. Dies kann lediglich bei der Planung mit berücksichtigt werden. Weiterhin ist beim System der zeitliche Vorlauf stark beschränkt, da ein Telegramm aufgrund der Sendeleistung von 1 Watt mit einem maximalen Abstand von ca. 300-500 Meter zur Anlage versendet werden kann.

Neben Frankfurt (Oder) wird das Bevorrechtigungssystem der Firma Greenwaysystems auch in Ingolstadt benutzt. Das Verfahren ist grundsätzlich gleich, allerdings senden die Fahrzeuge hier die Schaltbefehle über R09-Telegramme an die LSA. Diese werden auch von Fahrzeugen des ÖPNV benutzt. Die vom Steuergerät empfangenen Telegramme werden zur Auswertung an den Verkehrsleitrechner gesendet, welcher die Bevorrechtigung wieder lokal am Steuergerät auslöst. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass an den Lichtsignalanlagen keine zusätzliche Hardware angebracht werden muss. Nachteil ist jedoch auch, dass es zu Überschneidungen mit ÖPNV-Aussendungen kommen kann und zu Wartezeit aufgrund der Übertragung zum Verkehrsrechner und zurück. In beiden Städten ist das Ziel der Einsatzfahrt unbekannt, sodass keine vorausschauende Planung einer Einsatzroute und damit keine frühzeitige Identifizierung anzusprechender LSA möglich ist.

Für den damaligen technischen Stand konnte das System sicher eine gute Unterstützung bieten. Auf Basis der heutigen technischen Möglichkeiten wäre es noch präziser und vorausschauender umsetzbar.

2.1.3 Stührenberg STGPS Free Way

Das System „STGPS FreeWay“ [Stü17] von Stührenberg basiert auf GPS-Ortung der Einsatzfahrzeuge. Durch eine On-Board-Unit im Fahrzeug wird das Einschalten des Sondersignals erfasst und als Trigger für den Start der Ortung über GPS verwendet. Auf Basis einer intern hinterlegten Karte werden beim Überfahren von vorher festgelegten Vor- und Hauptanmeldepunkten bzw. eines Abmeldepunktes R09-Funktelegramme ausgesendet. Diese werden analog zum ÖPNV von allen LSA innerhalb der Funkreichweite (ca. 500-1000 Meter) empfangen und verarbeitet. Bei den LSA sind die entsprechenden Meldepunkte versorgt. Die zu den Meldepunkten zugeordnete LSA leitet die Nachrichten weiter an den Verkehrsrechner, welcher die Bevorrechtigung lokal am Steuergerät als Sondereingriff schaltet. Dieser Sondereingriff ist entgegen den SIEMENS-Steuergeräten als normaler Signalzeitplan mit einer Sondereingriffsnummer versorgt. Die An- und Abmeldepunkte müssen dabei statisch im System hinterlegt werden und sind unabhängig von der aktuellen Verkehrslage. Im Rahmen einer Hauptanmeldung an einem Knotenpunkt ist es möglich, dass zum Beispiel alle drei folgenden Kreuzungen bereits eine Voranmeldung erhalten. Weitere Aussendungen sind durch die begrenzte Reichweite des Bündelfunks nicht möglich. Das System wird unter anderem bereits in Detmold an einer Ausfahrt eines Krankenhauses genutzt.

2.1.4 GTT OPTICOM Emergency Response

Auch das US-Amerikanische Unternehmen „Global Traffic Technologies“ vertreibt ein System mit dem Namen „OPTICOM Emergency Response“ [Glo18] zur Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen. Wie bei allen anderen, bisher vorgestellten Herstellern, ist auch hier eine On-Board-Unit notwendig. Diese besteht aus einer Funkeinheit und einem GPS-Empfänger. Beim System gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten der Informationsübertragung. Der Befehl zur Bevorrechtigung kann über Infrarot oder über GPS und GRPS an die Empfangseinheit des Steuergeräts gesendet werden. Ein großer Vorteil bei der Nutzung der Infrarot- oder Datenfunkmethode ist, dass von der Verkehrsleitzentrale keine Verbindung über GPRS oder Kabel zu den Anlagen im Feld bestehen muss. Allerdings ist die Reichweite dieses Funkstandards meist auf unter 100 Meter beschränkt. In den amerikanischen Städten ist durch deren Aufbau im Schachbrettmuster und der damit verbundenen hohen Dichte an Lichtsignalanlagen auch mit weniger als 100 Meter noch eine akzeptable Funktion zu erreichen. Außerdem sind aufgrund der geradlinigen Straßen wenige Hindernisse im Weg, welche die Funkwellenausbreitung stören könnten. Zusätzlich zum Schaltbefehl und der Richtung, aus der ein Sondereinsatzfahrzeug kommt, kann zum Beispiel auch übertragen werden, dass ein Blinker gesetzt ist. Somit können benachbarte Anlagen bereits eine Voranmeldung des nahenden Fahrzeuges erhalten. Das Übermitteln dieser Information setzt jedoch voraus, dass die On-Board-Unit zum Beispiel über den CAN-Bus mit der Fahrzeugelektronik verbunden ist.

Interessant am System von GTT ist, dass die Firma selbst alle Ein- und Umbauten sowie die Programmierung vornimmt und dafür ein monatlicher Betrag in Höhe von 75 US-Dollar pro ausgerüstetem Fahrzeug und 135 US-Dollar für jede umgerüstete LSA fällig wird. Über die Art der Programmierung informiert der Hersteller auf seiner Internetseite nicht.

2.2 Zusammenfassung

Dass Bevorrechtigungssysteme für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben eine sinnvolle Ergänzung sein können, sieht man bereits daran, dass diese seit vielen Jahren durch zahlreiche Städte eingesetzt werden. Wenn man sich die beschriebenen Systeme genauer ansieht, entdeckt man mehrere Punkte, die es zu verbessern gilt. So können einige Systeme nur mit bestimmten Herstellern von LSA-Steuergeräten zusammen wirken. Besonders auffällig ist, dass alle betrachteten Systeme die Auslösung eines Sonderplans ähnlich der ÖPNV-Bevorrechtigung mit Voranmelde- und Hauptanmeldepunkten durchführen. Durch diese starren Punkte ist es unmöglich, auf aktuelle Verkehrssituationen oder Rückstau vor LSA einzugehen. Außerdem kann bei diesem Vorgehen nur eine Vorplanung von einer oder maximal zwei Lichtsignalanlagen in Folge durchgeführt werden. Auch im Bereich der Forschung arbeitet man daran, die genannten Schwächen der bisherigen Systeme zu beseitigen. In diesem Rahmen beteiligt sich das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. an einem Projekt mit dem Namen „HALI Berlin“. Ein

Ziel im Projekt ist es, die Schaltzeitpunkte zum Start einer BOS-Bevorrechtigung dynamisch zu berechnen und je nach Verkehrslage automatisch anpassen zu können. Außerdem sollen zur Übermittlung von Koordinaten der Einsatzstellen die Leitstellen von Feuerwehr und Polizei ins Projekt einbezogen werden. Mithilfe dieser Koordinaten wird eine streckenweite Berechnung von Umschaltzeitpunkten ermöglicht.

2.3 HALI Berlin

„HALI Berlin“ ist ein Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi), welches im Zeitraum von Juli 2017 bis Juni 2019 läuft. Neben dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) am Standort Berlin-Adlershof und der Fraunhofer-Gesellschaft sind außerdem die „Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz“, die „Polizei Berlin“, die „Berliner Feuerwehr“, die Firmen „Siemens AG“, „Airbus DS GmbH“ sowie „IABG GmbH“ am Projekt beteiligt.

Bei diesem Forschungsvorhaben soll der Satellitennavigationsdienst GALILEO unter Nutzung des Zusatzdienstmerkmals „Public Regulated Service“ (PRS) zur Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen der Berliner Feuerwehr sowie der Polizei Berlin an Lichtsignalanlagen genutzt werden. Für dieses Vorhaben wurde das in Abbildung 2.1 dargestellte Testgebiet im Berliner Stadtteil Moabit ausgewählt. Hier befindet sich die Feuerwache 1400 Moabit in der Jagowstraße und in unmittelbarer Nähe auch die Wache des Polizeiabschnitts 33 in der Perleberger Straße. Im Testgebiet sind Häuserschluchten zu finden, welche für die Entwicklung des PRS-Empfängers von besonderem Interesse sind. Außerdem ist mit einer hohen Verkehrsbelastung zu rechnen, welche das Untersuchungsgebiet aus Sicht der LSA-Steuerung interessant macht. Von der Feuerwache sollen für den Testlauf ein Lösch- und Hilfeleistungsfahrzeug (LHF), eine Drehleiter (DLK) sowie ein Rettungswagen (RTW) sowie von der Polizei 3 Funkstreifenwagen (EWA) mit den PRS-Empfängern ausgestattet werden.

Die durch die PRS-Empfänger ermittelten Positionen werden dann über eine gesicherte und verschlüsselte Mobilfunkverbindung an einen zentralen HALI-Server übertragen. Dieser Server hat die Aufgabe, im Einsatzfall aus der aktuellen Position der Einsatzfahrzeuge und der Zielkoordinate des Einsatzortes eine Route unter Beachtung der Verkehrslage zu berechnen. Weiterhin nimmt er Bevorrechtigungseingriffe an den Lichtsignalanlagen im Testgebiet (siehe Abbildung 2.1) vor. Dazu werden in der ersten Umsetzungsphase an 5 Knotenpunkten (später an insgesamt 9) die Lichtsignalanlagen mit einem Industrie Computer(IPC) und einer Mobilfunkanbindung erweitert. Der IPC kann über Ein- und Ausgänge Signale an das Steuergerät (z.B. über FUP-Platter oder über BFD Kopfstecker) der LSA senden. Ebenso ist das Steuergerät in der Lage, Informationen zum aktuellen Systemzustand (wie Umlaufsekunde oder Signalzeitplan) und eine Bestätigung des Feuerwehreingriffs an den IPC zu übermitteln. Im Testgebiet gibt es die Besonderheit, dass vier der fünf Anlagen ausschließlich in Festzeitsteuerung betrieben werden und lediglich eine Anlage am größten Knotenpunkt mit einer verkehrsabhängigen Steuerung (VA) versorgt ist.

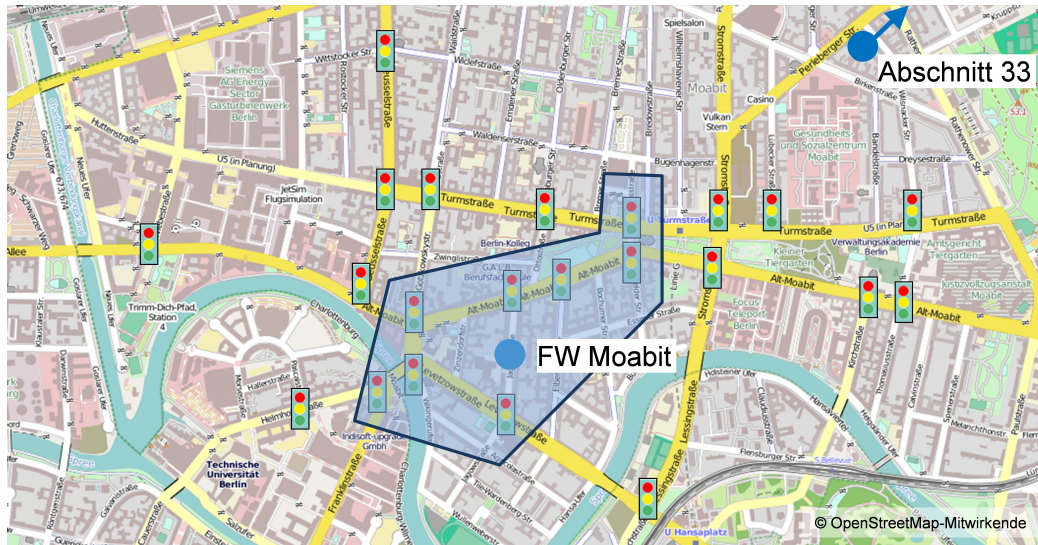


Abbildung 2.1: Testfeld Berlin Moabit (Quelle: DLR Berlin)

Da nach der „Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI- Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV)“ die städtische Straßenverkehrsinfrastruktur in einer Stadt mit über 500.000 Einwohnern, was in Berlin gegeben ist, zur kritischen Infrastruktur gehört und dieses System außerdem für Einheiten der BOS eine besondere Bedeutung hat, muss das komplette System strengen Sicherheitsrichtlinien genügen.

Wenn mit dem PRS-Empfänger ausgestattete Fahrzeuge zu einem Einsatz alarmiert werden, sendet die Leitstelle der Berliner Feuerwehr bzw. die Einsatzleitzentrale der Polizei Berlin die Koordinate des Einsatzortes an den HALI Server. Dieser fragt zunächst die aktuelle Position der beteiligten Sondereinsatzfahrzeuge ab. Aus diesen Informationen werden dann eine oder mehrere Routen zum Einsatzort definiert sowie die auf der Route liegenden LSA ermittelt. Parallel dazu erfolgt die Abfrage der LSA, in welchem aktuellen Signalzeitplan und in welcher Umlaufsekunde sich diese befinden. Aus der Position der Lichtsignalanlagen und der Route kann bestimmt werden, zu welchem ungefähren Zeitpunkt die Fahrzeuge an der Lichtsignalanlage eintreffen werden und somit auch, in welcher Sekunde des Umlaufs sich die Anlage dann befindet.

Der HALI Server ermittelt aus diesen Werten, zu welchem Zeitpunkt ein Bevorrechtigungseingriff an welcher LSA zu erfolgen hat. Diese Informationen werden direkt an den IPC der Steuergeräte übertragen, welche die Ansteuerung vornehmen. Den Einsatzkräften wird über eine Darstellung auf einem mitgeführten Tablet-PC angezeigt, welche Route für ihre Einsatzfahrt vorgesehen ist und welche LSA dabei beeinflusst werden. Nachdem die Sondereinsatzfahrzeuge die Kreuzungen verlassen haben, melden sie dies an den HALI Server, welcher wiederum den Bevorrechtigungseingriff an den LSA beendet und die Anlage in den Normalbetrieb schaltet.

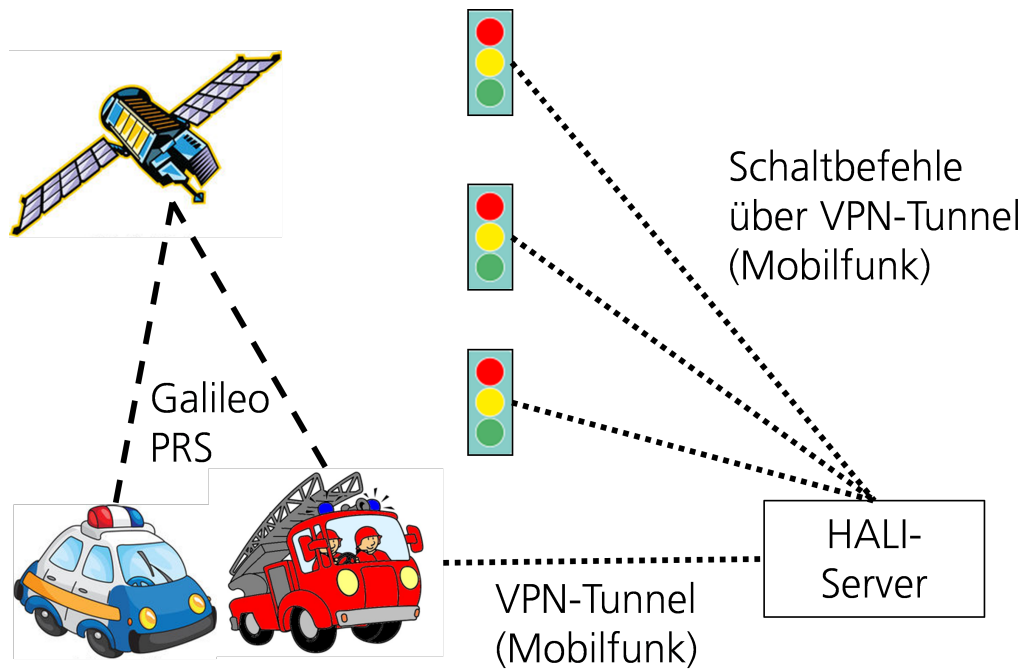


Abbildung 2.2: Systemaufbau HALI Berlin (Quelle: DLR Berlin)

2.4 Prädiktion von Schaltzeiten

Damit die Lichtsignalanlagen für die Sondereingriffe punktgenau geschaltet werden können, ist es erforderlich, dass eine Prädiktion von Schaltzeiten durchgeführt wird. Das bedeutet, dass versucht wird, möglichst genau vorherzusagen, wann eine bestimmte Signalgruppe die Freigabe erhält. Dazu wird zunächst betrachtet, welche Ansätze und Lösungen bereits vorhanden sind. Eine Auswahl derer wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Grundlegend kann man die Verfahren in drei Kategorien einteilen. Während manche Verfahren lediglich historische Daten verwenden, setzen andere auf aktuelle Detektordaten und Signalisierungszustände, um über statistische Aussagen die Schaltzeit vorher zu sagen. Der dritte Ansatz hingegen verwendet keine der bisher genannten Daten, sondern basiert auf Crowdsourcing.

Im Abschlussbericht des Projekts „Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA 2014)“ [Bäk14] wird sehr detailliert auf die verschiedenen Arten der Schaltzeitprognose eingegangen. Für das Projekt sollten Schaltzeitprognosen in Fahrzeuge übertragen werden, um dem Fahrer eine Geschwindigkeitsempfehlung zu geben. Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, das sowohl herstellerunabhängig, unabhängig von Schnittstellen als auch robust und erweiterbar ist. Zur Umsetzung wurde das Verfahren der Abschätzung über so genannte Kernzeiten vorgestellt. Als Kernzeit wird ein Zeitbereich innerhalb eines Umlaufs bezeichnet, in dem eine bestimmte Signalgruppe ein festes Signalbild hat. Da allerdings nicht immer eine aktuelle Umlaufsekunde des Steuergeräts zur Verfügung steht, wurde ein weiterer Ansatz mit Auto-korrelationsanalyse von historischen Daten vorgestellt [Kri14]. Diese liefert besonders für Festzeitsteuerungen eine hervorragende Prognostizierbarkeit der Signalverläufe. Auch bei

teilverkehrsabhängigen Steuerungen kann dieses Verfahren für einen Prognosehorizont von über 180 Sekunden verwendet werden. Bei vollverkehrsabhängigen Steuerungen hingegen ist eine Schaltzeitprognose über mehrere Sekunden hin ohne weitere Informationen kaum umsetzbar.

Außerdem wurde ein Online-Verfahren entwickelt, das über die Berechnung eines Basisvektors, die Wahrscheinlichkeit für die Freigabe einer Signalgruppe je Umlaufzeit enthält. Damit kann eine Aussage zur Steuerungsart sowie den dazugehörigen Parametern wie Kernzeiten, Mindestgrünzeiten und Maximalgrünzeiten gegeben werden. Im Bericht wird zusätzlich noch Aufschluss über die Hinzunahme von ÖPNV-Informationen zur Verbesserung der Prognose gegeben.

Auch Hans Jakob Kathes [Kat17] beschäftigte sich innerhalb seiner Dissertation mit dem Thema der Schätzung von künftigen Schaltzeitpunkten. Er unterscheidet dabei in drei Kategorien nach der Art und Menge der Eingangsgrößen der Verfahren. Das Verfahren von PROTOSCHKY ET AL. benutzt zum Beispiel lediglich historische Daten und wertet diese über eine Häufigkeitsverteilung und mittels des Kalman-Filters aus [Pro14]. Aber auch Markov-Ketten werden laut seiner Arbeit für die Prädiktionen benutzt. Dieses Verfahren eignet sich nach den Untersuchungen auch für vollverkehrsabhängige Steuerungen. Dabei werden aber neben historischen Daten auch aktuelle Signalisierungszustände und Detektordaten benötigt. Weiterhin wird die Möglichkeit erörtert, Schaltzeiten über Floating Car Data (FCD) vorherzusagen.

Wenn weder historische noch aktuelle Daten zur Verfügung stehen, ist es eine Möglichkeit, die Daten über das sogenannte Crowdsourcing zu ermitteln [Kou11]. Dabei erfassen Smartphones, die hinter der Windschutzscheibe montiert sind, über ihre Kamera die aktuellen Signalisierungszustände und übermitteln diese an eine Datenbank. Der Austausch der Informationen kann dann zwischen den Nutzern über eine WLAN-Verbindung erfolgen. Laut den Autoren ist damit bei zeitabhängiger Signalprogrammauswahl ein absoluter Vorhersagefehler von 0,66 Sekunden zu erzielen.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass es zwar bereits einige Verfahren zur Prädiktion von Schaltzeiten gibt. Allerdings richten sich alle Verfahren an der rein passiven Verwendung durch den Individualverkehr aus. Den Fahrzeugführern soll somit eine Unterstützung gegeben werden, wann eine Freigabe für ihre Fahrtrichtung zu erwarten ist. In diesem Zusammenhang wäre es über die Bestimmung des Abstands zur LSA möglich, auch eine Geschwindigkeitsempfehlung für jedes Fahrzeug individuell auszugeben. Für die Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen muss jedoch ein aktives Verfahren genutzt werden, welches die Anlage in ein bestimmtes Sonderprogramm überführt. Dieser Prozess ist kein sich ständig wiederholendes Ereignis, sondern eher als Sonderfall anzusehen. Deshalb können bestehende Verfahren zur Schaltzeitprognose nur in Ansätzen genutzt werden. Es ist hierbei vielmehr ein Verfahren zu entwickeln, dass keine Prognose über einen Zustand, sondern zur Dauer eines Signalprogrammwechsels abgibt. Die Dauer dieses Wechsels wird in der Folge als Signallaufzeit bezeichnet und ist in Abhängigkeit der Zwischen- und Mindestfreigabezeiten der Signalgruppen in den Umlaufsekunden jeweils verschieden.

3 Konzept und Umsetzung einer optimierten Einsatzwagenbevorrechtigung

Um Sondereinsatzfahrzeugen an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage eine haltfreie Überfahrt zu ermöglichen, ist es erforderlich, dass spätestens mit dem Eintreffen des SEF an der LSA die Signalgruppe „grün“ zeigt, aus der das SEF kommt. Dieses Signal muss so lange gezeigt werden, bis das SEF die Kreuzung passiert hat. Für diese Anwendung bietet sich die Nutzung von so genannten Sondereingriffsplänen an. Ein LSA-Steuergerät kann in diese Pläne sehr schnell wechseln, da lediglich Mindestfreigabezeit und Zwischenzeiten abgewartet werden müssen. Im Plan ist ein Haltepunkt festgelegt, an dem der Schaltzustand bis zur Aufhebung des Sondereingriffs gehalten wird. Mit einem Nachlauf ist es möglich, Signalgruppen „grün“ zu schalten, die nicht im Sonderplan enthalten waren, um eventuell entstandenen Stau abzubauen. Nach dem Sondereingriff geht das Steuergerät in den letzten Signalzeitplan zurück.

Eine alternative Möglichkeit ist die Nutzung von besonderen Phasen. Hierbei würde die Einleitung des Phasenwechsels, das Halten der Phase sowie der Wechsel in die Ursprungsphase mit in der Logik der verkehrsabhängigen Steuerung enthalten sein. Dieses Vorgehen bietet sich an, wenn Knotenpunkte komplett neu geplant werden und deshalb ohnehin eine neue Logik erarbeitet werden muss. Für das Projekt „HALI Berlin“ wurde die Vorgabe gemacht, dass Feuerwehrpläne zu nutzen sind, daher wird die Möglichkeit über Phasen in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

3.1 Konzeptentwurf

Alle bestehenden Systeme nutzen fest definierte Vor- und Hauptanmeldepunkte, um in Sondereingriffspläne oder bestimmte Phasen zu schalten. Im Projekt „HALI Berlin“ soll nun hingegen eine verbesserte Strategie genutzt werden, die auf Basis der aktuellen Position des Sondereinsatzfahrzeugs bzw. des Fahrzeugverbands und des aktuellen Zustands der Lichtsignalanlage einen optimalen Umschaltzeitpunkt zum Sondereingriffsplan berechnet. Zu diesem Zweck wurde ein Konzept (siehe Abbildung 3.1) entwickelt. Darin werden in mehreren Schritten die besten Schaltzeitpunkte bestimmt. Wichtige Voraussetzung ist allerdings, dass auch das Ziel der Einsatzfahrzeuge bekannt ist und so ein Routenvorschlag ermittelt werden kann. Das Konzept betrachtet alle Lichtsignalanlagen, die auf der ermittelten Route sind. Im ersten Schritt, welcher in Kapitel 3.2 näher erläutert wird, werden so genannte Signallaufzeiten ermittelt (siehe roter Bereich in Abbildung 3.1). Im folgenden Schritt wird

mit Hilfe eines Algorithmus der beste Umschaltzeitpunkt berechnet (siehe orangefarbener Kasten in Abbildung 3.1). Dieser Schritt wird in Kapitel 3.3.1 genauer erläutert. Der Algorithmus benötigt die im ersten Schritt berechneten Signallaufzeiten sowie den aktuellen Status der Lichtsignalanlagen und die Fahrzeugposition des Sondereinsatzfahrzeugs. Im nächsten Schritt, welcher in Kapitel 3.3.2 behandelt wird, werden dem Algorithmus zusätzlich Informationen über Rückstaulängen vor den LSA übermittelt (siehe grüner Abschnitt in Abbildung 3.1). Der Algorithmus berechnet damit noch exakter die Schaltzeitpunkte. Diese Schaltzeitpunkte werden dann über Schnittstellen an eine SUMO Simulation sowie ein LSA Steuergerät vom Typ C940V gesendet.

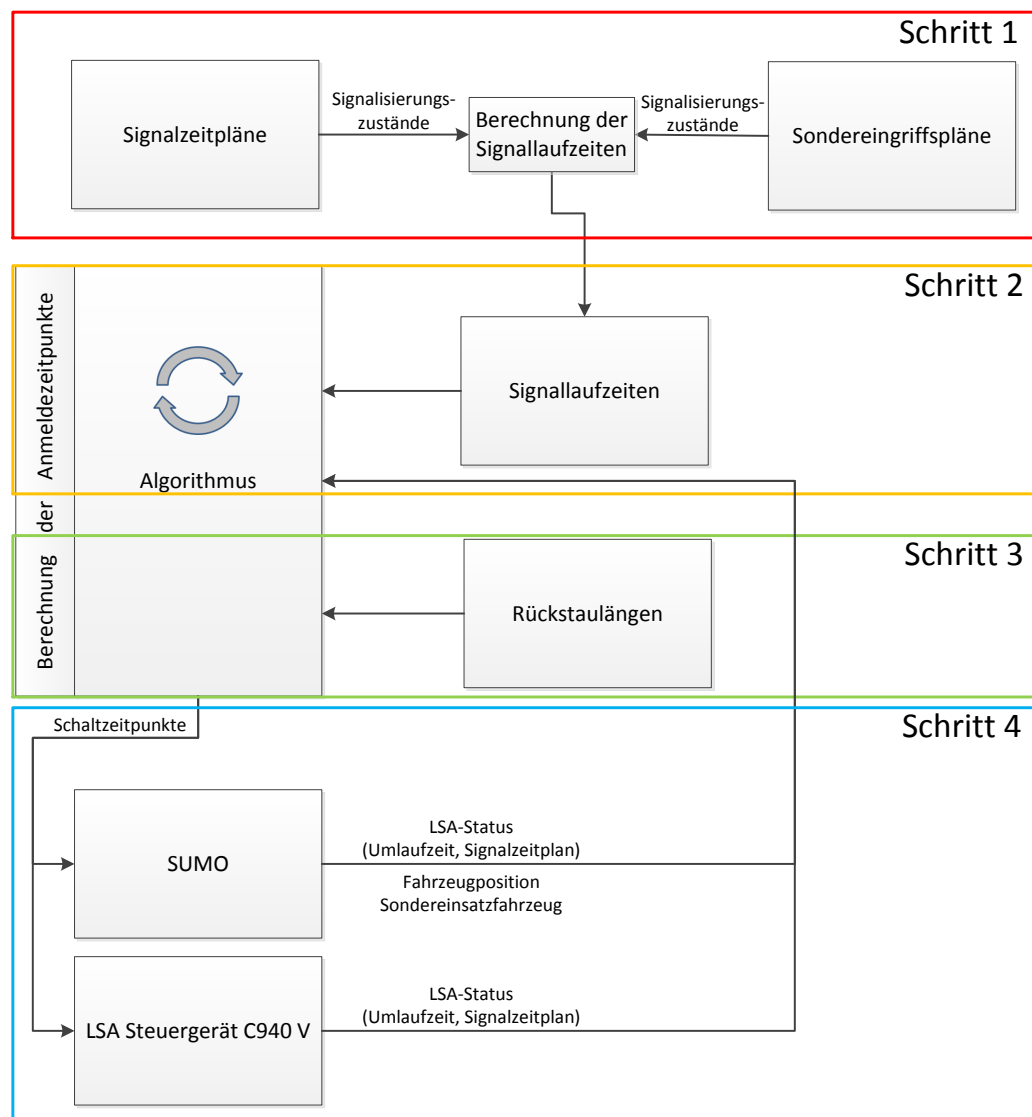


Abbildung 3.1: Konzeptentwurf zur optimierten Bevorrechtigungsstrategie
(Quelle: Eigene Darstellung)

3.2 Berechnung von Signallaufzeiten anhand eines Festzeitplans

Um einen optimalen Umschaltzeitpunkt berechnen zu können, ist es zunächst erforderlich, dass die Zeitdauer berechnet wird, die es benötigen würde, um von einem regulären Signalzeitplan in einen Sondereingriffsplan zu schalten. Bei diesem Umschaltvorgang müssen die jeweiligen Mindestfreigabe- und Zwischenzeiten abgewartet werden. Da die verbleibende Mindestfreigabe- und Zwischenzeit je Signalgruppe innerhalb eines Umlaufs unterschiedlich sind, muss diese Vorberechnung für jede Umlaufsekunde separat vorgenommen werden. Diese Zeitdauer wird als Signallaufzeit bezeichnet.

Dabei ergibt sich immer der direkte Bezug zwischen Signalzeitplan (SZPL), Sondereingriffsplan und den entsprechenden Umlaufsekunden (TX). Die Berechnung soll beispielhaft an einer Umlaufsekunde erklärt werden. Da die manuelle Berechnung sehr zeitaufwändig und fehleranfällig gewesen wäre, wurde ein Programm in der Programmiersprache JAVA [Ull07] entwickelt, welches zunächst alle Signalgruppen, Zwischenzeiten und Signalzeitpläne aus einer OCIT 2.0 - Exportdatei ausliest. Diese Exportdatei kann zum Beispiel mit dem Planungsprogramm LISA+ oder SiTraffic Office erstellt werden.

Die Berechnung erfolgt immer für einen Signalzeitplan in Bezug zu einem Sondereingriffsplan in jeder Umlaufsekunde. Es ergeben sich somit pro Signalzeitplan n Arrays (n = Anzahl der Sondereingriffspläne), deren Größe gleich der Umlaufzeit (TU) des entsprechenden Signalzeitplans ist. In der Regel gibt es für jede Zufahrt, aus der ein Sondereinsatzfahrzeug kommen kann, einen Sondereingriffsplan. In Sonderfällen kann es aber auch notwendig sein, noch mehr Pläne zu erstellen. In Steuergeräten der Firma SIEMENS AG können bis zu drei Feuerwehrlpläne und zwei BÜSTRA-Pläne versorgt werden. Feuerwehr- und BÜSTRA-Pläne unterscheiden sich nur in der Priorität und können sonst gleichwertig zur Bevorrechtigung genutzt werden.

Zuerst müssen Signalgruppen definiert werden, die nach dem ausgewählten Sondereingriffsplan die Freigabe schalten (einfahrende Ströme). Die ausfahrenden Ströme bestimmt das Programm dann selbstständig anhand des vorliegenden Signalzeitplans. Es wird hierbei allerdings empfohlen, nur maßgebende Signalgruppen anzugeben. Als maßgebend werden alle Signalgruppen bezeichnet, die für eine richtungsunabhängige Durchfahrt eines Sondereinsatzfahrzeugs unbedingt erforderlich sind.

Sollte im Sondereingriffsplan zusätzlich zur Vollscheibe der Zufahrt zum Beispiel noch ein einfeldiger Signalgeber wie Diagonalgrün zugeschaltet werden, sind diese zu vernachlässigen. Besonders, wenn diese Signalgeber in den regulären Signalzeitplänen keine gemeinsame Freigabe haben, kann es zu ungewollten Versatzzeiten kommen. Steuergeräte der Firma SIEMENS AG schalten unter Umständen den kompletten Sondereingriffsplan nicht zur gleichen Zeit. Hierbei ist der Sondereingriffsplan nicht als Festzeitplan, sondern eher als Ziel-Signalisierungsbild zu verstehen. Die einzelnen Signalgruppen werden zugeschaltet, sobald Mindestfreigabe- und Zwischenzeit zu deren feindlichen Signalgruppen abgelaufen ist. Das beschriebene JAVA-Programm nutzt hierbei immer den höchsten Wert der Signal-

laufzeit. Deshalb käme an dieser Stelle zu ungewollten Versatzzeiten, wenn ein zusätzlicher Signalgeber aufgrund von Zwischenzeiten zu Fußgängern erst später zugeschaltet werden kann, die Hauptrichtung (Vollscheibe) jedoch schon „grün“ zeigt.

Zur Berechnung durchläuft der Algorithmus in einer Schleife alle Umlaufsekunden des Signalzeitplans und bestimmt, welche ausfahrenden Signalgruppen feindlich zu den einfahrenden Signalgruppen des Sondereingriffsplans wären. Von den feindlichen Strömen wird in der Folge die Zwischenzeit bestimmt. Weiterhin wird geprüft, wie lange die feindliche Signalgruppe zum Zeitpunkt des Eingriffs schon „grün“ zeigt und ob die Mindestfreigabezeit damit erfüllt ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird die restliche Mindestfreigabezeit noch zur Zwischenzeit addiert. Die Signalgruppe mit der längsten Zeit gilt als maßgebend für den Wechsel zwischen Signalzeitplan und Sondereingriffsplan in der jeweiligen Umlaufsekunde. Diese Zeit wird in einer Datenstruktur gespeichert. Am Ende dieser vorbereitenden Berechnung erhält man je Signalzeitplan und Sondereingriffsplan (bis zu 5 Stück) eine Datenstruktur, deren Größe die Umlaufdauer des Signalzeitplans ist. Der Inhalt der Datenstruktur ist die Signallaufzeit, die es benötigen würde, um in den jeweiligen Sondereingriffsplan zu schalten. In Abbildung 3.2 ist für ein Signalprogramm beispielhaft die Signallaufzeit in den Feuerwehrplan abgetragen. Daran kann man sehr gut die unterschiedlichen Zustände des Signalzeitplans ablesen. Auffällig ist der erneute Anstieg der Signallaufzeit zu Sekunde 26. Der Grund hierfür ist die Freigabe einer Signalgruppe mit einer höheren Zwischenzeit zu den maßgebenden Signalgruppen des Sondereingriffsplans.

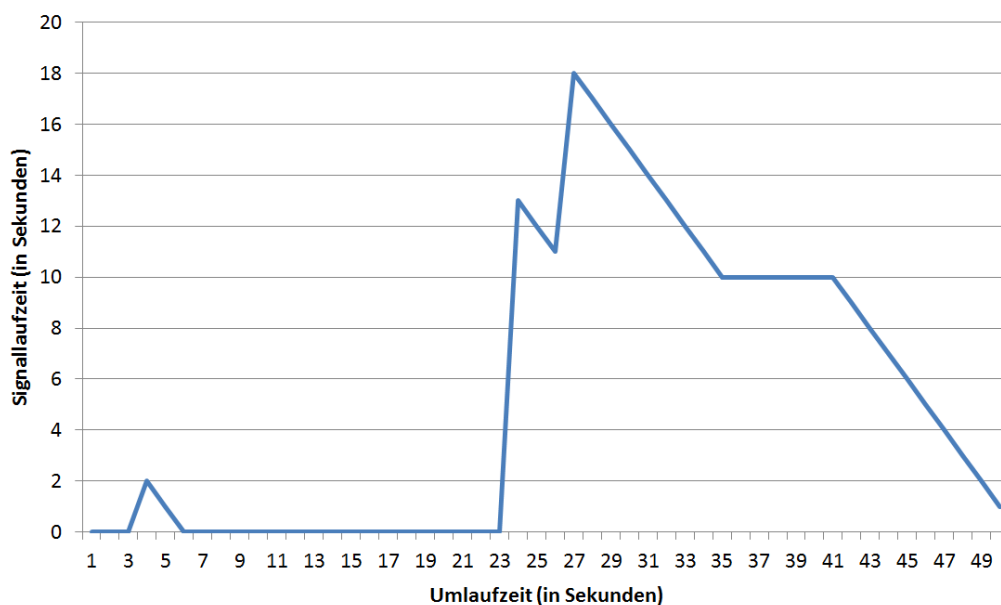


Abbildung 3.2: Signallaufzeiten von SZPL 02 Levetzowstraße / Jagowstraße zur Feuerwehrfreigabe aus Richtung Norden SZPL 10
Wertetabelle in Anhang B (Quelle: Eigene Darstellung)

3.3 Berechnung des Anmeldezeitpunkts anhand der Signallaufzeiten

In diesem Kapitel wird das Programm beschrieben, mit dem die Anmeldezeitpunkte (siehe blaue Linie in Abbildung 3.3) dynamisch anhand der in Kapitel 3.2 beschriebenen Signallaufzeiten berechnet werden können. Für die Bestimmung benötigt man die Position eines Sondereinsatzfahrzeuges sowie den Status der Lichtsignalanlagen auf der Route. (siehe orangefarbener Bereich in Abbildung 3.1)

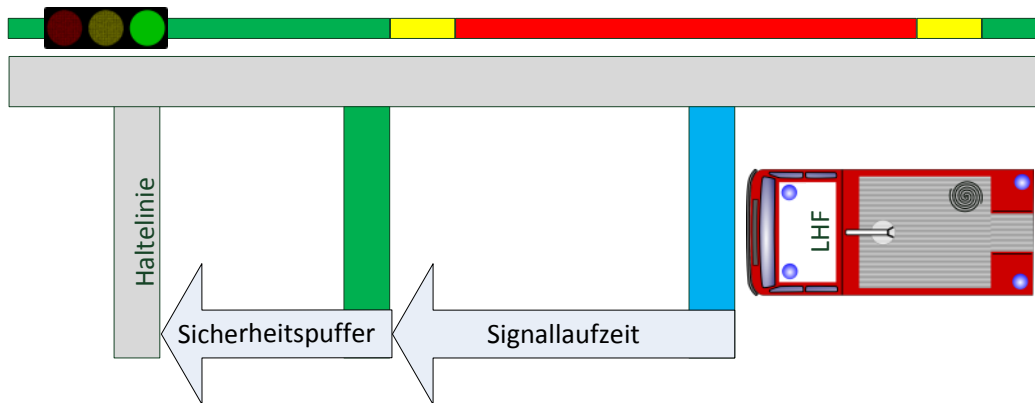


Abbildung 3.3: Schema zum Schaltzeitpunkt
(Quelle: Eigene Darstellung mit Grafik¹)

3.3.1 Algorithmus

Der eigentliche Berechnungsalgorithmus wird für alle Lichtsignalanlagen beliebig oft ausgeführt und gibt als Rückgabewert eine verbleibende Restwartezeit bis zum Start der Bevorrechtigung. Der Algorithmus besteht zuerst aus zwei Zeitzählern, welche die Zeit bis zur Lichtsignalanlagen sowohl aufwärts als auch abwärts zählen. Hierfür wird zunächst die Restzeit bestimmt. Diese ist die eigentliche Restfahrzeit abzüglich eines Sicherheitspuffers. Das kann man sich so vorstellen, dass die Haltelinie virtuell um den Wert des Sicherheitspuffers näher Richtung Sondereinsatzfahrzeug rückt. Im ersten Schritt wird dann anhand der aktuellen Umlaufzeit die Umlaufzeit in den nächsten Zeitschritten bis zum Erreichen der Haltelinie berechnet und in einem Array gespeichert. Dafür ist es notwendig, die Umlaufzeit (TU) des aktuellen Signalzeitplans zu kennen, um die folgenden Umlaufzeiten auch berechnen zu können, falls es bis dahin einen Umlaufwechsel gibt. Aufgrund des Signalzeitplans kann nun auch das Array mit den in Kapitel 3.2 ermittelten Werten geladen werden. Aus dem Umlaufzeitarray und der Zeitdauer bis zum Erreichen des Sondereingriffsplans wird nun ein

¹ <https://publicdomainvectors.org/en/free-clipart/Fire-emergency-truck-top-view-vector-image/27092.html>

weiteres Array erstellt, das zu jedem Zeitschritt bis zum Erreichen der Haltelinie die Zeitdauer bis zum Erreichen der Freigabe für die SEF beinhaltet.

Im Folgenden durchläuft eine rückwärtslaufende Schleife die Zeitdauer bis zum Erreichen der Haltelinie. Abbruchkriterium ist, wenn die Zeitdauer bis zum Erreichen des Sondereingriffsplans kleiner oder gleich der verbleibenden Restfahrdauer bis zur Haltelinie ist. Sollte dieser Punkt nicht erreicht werden, endet die Schleife an der Position 0, was bedeutet, dass sofort geschaltet werden muss. Danach wird noch eine Pufferzeit berechnet, die entsteht, wenn der Schaltbefehl zeitiger gesendet werden muss, als es eigentlich notwendig wäre, da zu späteren Zeitschritten die Zeitdauer wieder ansteigen würde und so die Bevorrechtigung nicht mehr zu erreichen wäre. Die Zeitdauer steigt immer dann an, wenn der Signalzeitplan in eine Richtung schaltet, die feindlich zum Fahrweg der Feuerwehr wäre, da beim Zurückschalten mittels Feuerwehrplan die Mindestfreigabezeit der feindlichen Richtung und die Zwischenzeit zur Signalgruppe des Feuerwehrplans eingehalten werden muss. Der berechnete Puffer wird in Folge als Systempuffer bezeichnet.

$$\text{Systempuffer} = \text{Restfahrzeit bis Haltelinie} - \text{Zeit bis zur Freigabe} \quad (3.1)$$

3.3.2 Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation

Damit die Bestimmung des Schaltzeitpunkts auch die aktuelle Verkehrslage berücksichtigen kann, ist es erforderlich, die Anzahl der vorgestauten Fahrzeuge zu kennen. Dazu wird von der Zeit, die das SEF bis zur Haltelinie der LSA benötigt, zunächst ein Sicherheitspuffer abgezogen, welcher vorerst mit 5 s angenommen wurde. Damit rückt man die Haltelinie virtuell 5 s nach vorn. Außerdem wird von der Restfahrzeit noch der Zeitbedarf abgezogen, den es benötigt, um die vorgestauten Fahrzeuge abzubauen. Dabei wurde nach DITTRICH zunächst ein statischer Zeitbedarfswert von 2,5 Sekunden pro Fahrzeug festgesetzt. [Dit11] [Sch97] Vom hier berechneten Puffer für Stauabbau wird der im vorgehenden Schritt beschriebene Systempuffer abgezogen, sodass nur der tatsächliche zusätzliche Zeitbedarf an den Algorithmus übergeben wird.

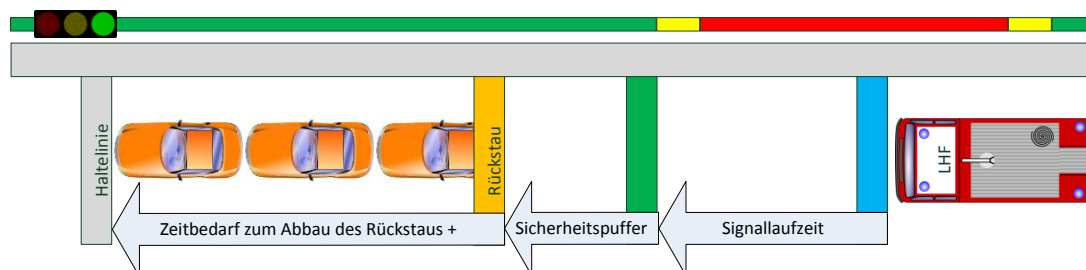


Abbildung 3.4: Schema zum Schaltzeitpunkt mit Verkehrsabhängigkeit
(Quelle: Eigene Darstellung mit Grafiken²³)

3.4 Simulationsstudie

Um die ermittelten Schaltzeitpunkte bereits vor dem Einsatz im Testgebiet evaluieren zu können, benötigt man Live-Daten von den Lichtsignalanlagen sowie die sich verändernde Fahrzeugposition eines Sondereinsatzfahrzeugs. Da dies sehr schwer unter reellen Bedingungen durchzuführen ist, wurde ein Simulationszenario in der Simulationsumgebung SUMO (Simulation of Urban MObility) mit der Version „dev-SVN-r24743“ erstellt. SUMO ist eine quelloffene Anwendung, die vom Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. entwickelt wurde. [Beh11] Für die Steuerung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen wurde ein Programm in der Programmiersprache Java [Ull07] entwickelt. Zum Zugriff auf die SUMO-Simulation wurde die TraaS-Schnittstelle (Traffic Control Interface as a Service) [Kru14] benutzt.

Bei einer Simulation muss jedoch immer beachtet werden, dass man nur mit einem Abbild der Wirklichkeit arbeitet. So wurden zum Beispiel Fahrzeuge anhand von Zähldaten ohne Beachtung des Modal Split generiert. Da bei dieser Untersuchung das Hauptaugenmerk auf den grundlegenden Funktionalitäten der Schaltzeitpunkte lag, konnte der Modal Split vernachlässigt werden. In der Simulation sind daher keine Busse, LKW oder Fußgänger zu sehen. Weiterhin kann man zum Beispiel von einer Simulation nicht auf interne Funktionen eines LSA-Steuergeräts wie Zwischenzeit- oder Mindestfreigabezeitüberwachung zurückgreifen. Diese Funktionen waren jedoch so wesentlich, dass sie manuell nachempfunden wurden. Auch hier kann man nicht von einer Eins-zu-Eins-Abbildung sprechen, sodass der anschließende Labortest ein guter Schritt hin zur praktischen Umsetzung war.

3.4.1 Vorbereitungen

Um die geplante Simulation durchführen zu können, benötigt man drei grundlegende Bausteine, die im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden:

- ein Verkehrsnetz (bzw. ein Ausschnitt daraus),
- eine Verkehrsnachfrage,
- sowie die Lichtsignalanlagen mit ihren Festzeitplänen.

Zuerst wurde ein Netzausschnitt vom Stadtbereich Moabit ausgewählt und mittels „osmToSumo“-Tool aus OpenStreetMap in eine SUMO-Netzdatei (siehe Abbildung 3.6) exportiert. Aus diesem Netz wurden alle unnötigen Nebenstraßen entfernt, da auf diesen mit wesentlich weniger Verkehr zu rechnen ist als auf den Hauptstraßen. Deshalb sollten diese für die Simulation keine Rolle spielen.

In der Exportdatei waren alle Lichtsignalanlagen bereits vorhanden. Damit die Lichtsignalanlagen in der Simulation auch mit den Signalgruppen und Signalzeitplänen der Wirklichkeit

² <https://publicdomainvectors.org/en/free-clipart/Fire-emergency-truck-top-view-vector-image/27092.html>

³ <https://pixabay.com/de/auto-fahrzeug-orange-nach-oben-307714/>

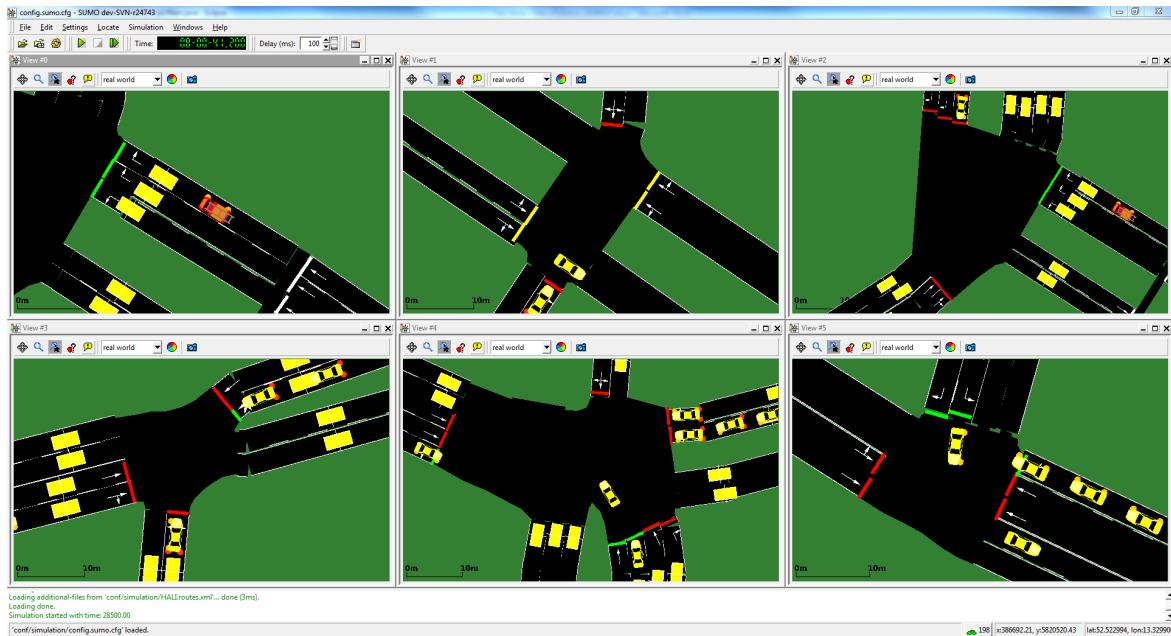


Abbildung 3.5: Graphische Benutzeroberfläche von SUMO mit 6 Ansichten
oben v.l.n.r.: Übersichtskarte Feuerwehr, Jagowstraße/Levetzowstraße, Gotzkowskystraße/Levetzowstraße
unten v.l.n.r.: Jagowstraße/Alt-Moabit, Alt-Moabit/Gotzkowskystraße, Alt-Moabit/Beusselstraße/Kaiserin-Augusta-Straße

übereinstimmten, waren verschiedene Anpassungen an den Abbiegebeziehungen und Fahrstreifen notwendig. Außerdem war es erforderlich, die vorhandenen Signalzeitpläne zu übertragen. Auf die verkehrsabhängige Steuerung, welche am Knoten „Alt-Moabit / Gotzkowskystraße“ versorgt ist, wurde zunächst verzichtet, da zum derzeitigen Stand unklar war, ob die vorhandene VA-Logik wirklich in dieser Form eingespielt ist. Da das Format der Signalzeitpläne in SUMO sehr speziell ist und die manuelle Eingabe sehr lange gedauert hätte, wurde ein Programm für diesen Import in der Programmiersprache JAVA entwickelt. Über das bereits im Kapitel 3.2 beschriebene OCIT-Interface war das Programm in der Lage, aus einer OCIT-Exportdatei die Signalgruppen und Signalzeitpläne auszulesen. Mit den ausgelesenen Werten erstellt das Programm, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, einen Signalzeitplan in der von SUMO vorgegebenen Kodierung. Dieser Signalzeitplan wird für den Import in SUMO vor der Ausgabe noch reduziert. Dazu werden für alle unterschiedlichen Signalisierungszustände der LSA die Zeiten bestimmt und der Signalzeitplan auf diese Angaben reduziert. Die Ausgabe erfolgt im Textformat und kann in späteren Arbeitsschritten in die Netzdatei oder eine Additional-Datei von SUMO eingefügt werden.

Damit die Zuordnung der Signalgruppen der Planungsdatei zu den Signalgruppen der SUMO-Simulation funktioniert, ist es erforderlich, vor dem Export in Sitraffic Office oder LISA+ bei den Signalgruppen im Feld „Beschreibung“ den „Link-Index“ der entsprechenden Signalgruppe aus der Simulation anzugeben. Wenn mehrere Indexe angegeben werden sollen, sind diese durch Semikolon zu trennen. Nach der Erstellung der SUMO-lesbaren Signalzeitpläne ist noch die ID der LSA aus SUMO in das dafür vorgesehene Feld einzufügen.

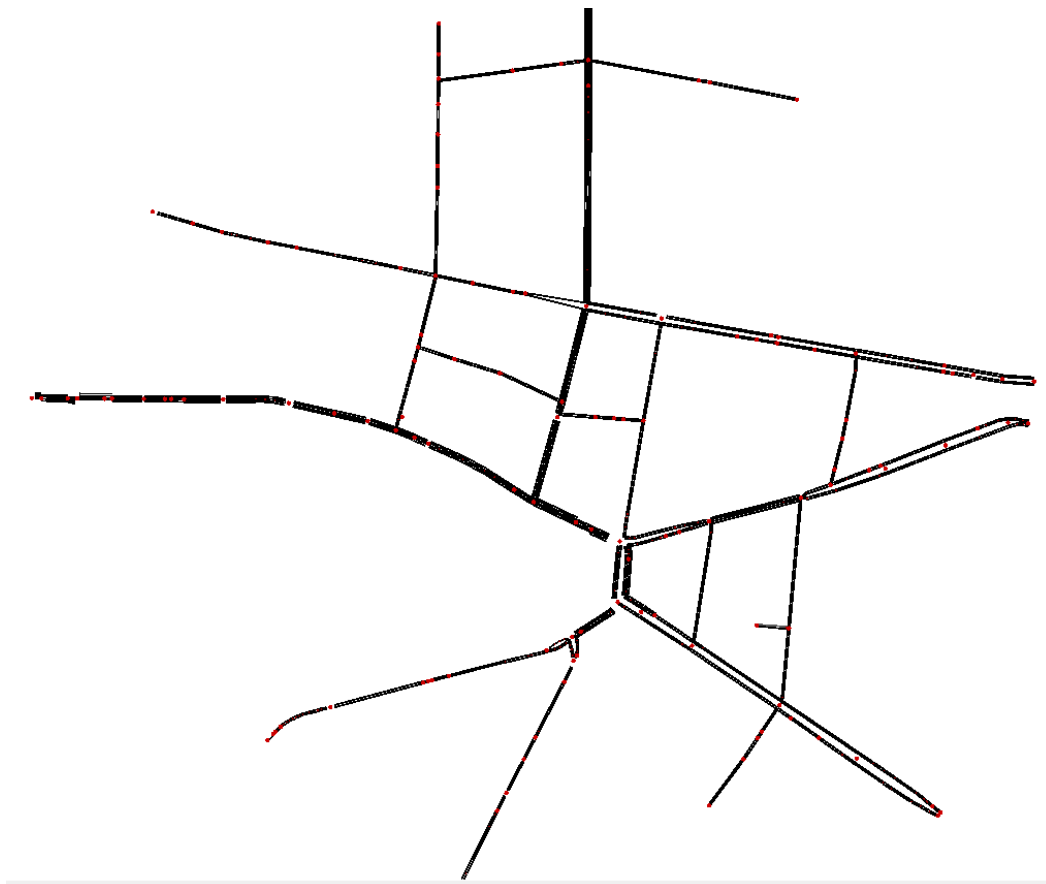


Abbildung 3.6: SUMO-Netz

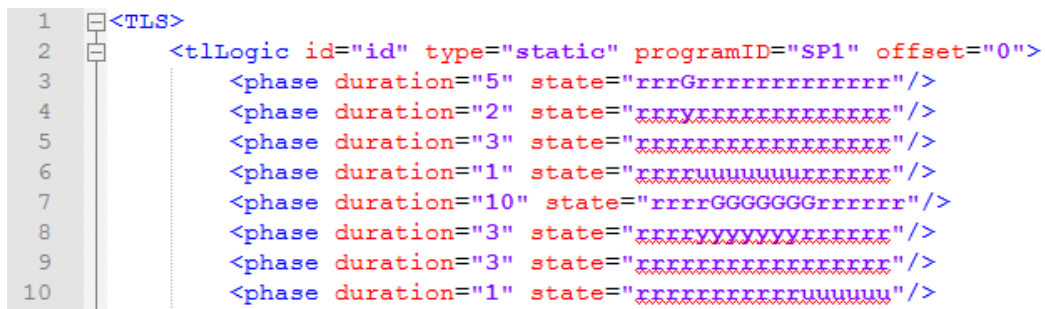


Abbildung 3.7: Ausschnitt eines Signalzeitplans in SUMO-Kodierung
am Beispiel Levetzowstraße / Gotzkowskystraße SZPL 01

Für eine realitätsnahe Simulation war es weiterhin erforderlich, dass auch der Verkehr des Gebiets Moabit möglichst gut abgebildet wird. Dazu wurden von der Verkehrslenkung Berlin Handzähldaten von Knotenpunkten und Querschnitten der letzten Jahre bereitgestellt. Damit sollte die Verkehrsnachfrage für die Zeiträume von 07 bis 09 Uhr, von 11 bis 12 Uhr sowie von 15 bis 17 Uhr als Fahrzeugrouten in SUMO nachgebildet werden. Zunächst wurde der „JTR-Router“ als Hilfsmittel benutzt, um die Fahrzeugrouten zu erstellen. Dieser arbeitet mit absoluten Verkehrsmengen an Zu- und Abfahrtskanten sowie prozentualen Verteilungen an Knoten innerhalb des Netzes. Es wurden 6 Zu- und Abfahrtskanten definiert sowie die Verteilung auf den Knoten je nach Fahrstreifen angegeben. Die ausgegebenen Routen lieferten jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zu Beginn der Simulation waren zu wenige Fahrzeuge vorhanden, später zu viele, so dass es einen großen Stau im Netz gab. Dabei fiel auf, dass viele Fahrzeuge realitätsferne Routen durch das Netz nahmen.

Aus diesem Grund folgte eine weitere Erstellung von Routen durch „Flow-Router“. Dieser berechnet Routen auf Basis von absoluten Verkehrsmengen an Induktionsschleifen im Netz. Deshalb wurden im SUMO-Netz Induktionsschleifen verortet, welchen der Tagesgang der Handzählraten zugeordnet wurde. Die nun erzeugten so genannten „Flows“ lieferten wesentlich realistischere Ergebnisse als im ersten Ansatz.

Wichtiger Baustein der Vorbereitungen war, dass auch der Rückstau vor den LSA in der Simulation zur Berechnung der Anmeldezeitpunkte nutzbar gemacht wird. Dazu wurde die SUMO-Funktion „getLastStepHaltingNumber“ verwendet und eine Erweiterung implementiert. Die Funktion gibt die Anzahl der Fahrzeuge zurück, die auf einem Fahrstreifen (engl. Lane) halten. Die Erweiterung berücksichtigt nun, dass haltende Fahrzeuge mehrerer aufeinanderfolgender Fahrstreifen addiert werden. Sollte mehr als ein paralleler Fahrstreifen zur Verfügung stehen, wird der Fahrstreifen mit der maximalen Anzahl an haltenden Fahrzeugen ermittelt und nur dieser Wert zurückgegeben. Es wurde dabei die Annahme getroffen, dass Fahrzeuge auf parallelen Fahrstreifen zeitgleich abfließen.

Nachdem diese Vorbereitungen abgeschlossen waren, konnte die Simulation der Anmeldezeitpunkte der vorgestellten Bevorrechtigungsstrategie starten.

3.4.2 Simulation von Anmeldezeitpunkten

Zur Simulation der Anmeldezeitpunkte wird eine statisch hinterlegte Einsatzroute benutzt. Diese wurde so ausgewählt, dass sie über vier der fünf Lichtsignalanlagen führt (siehe Abbildung 3.8). In der Realität muss diese Route noch durch einen Router aus der Ist-Position der Einsatzfahrzeuge und der Einsatz-Ziel-Position, welche aus den Leitstellen übertragen wird, berechnet werden. Die Einsatzfahrt startet in der Simulation zu einem fest eingestellten Zeitpunkt.

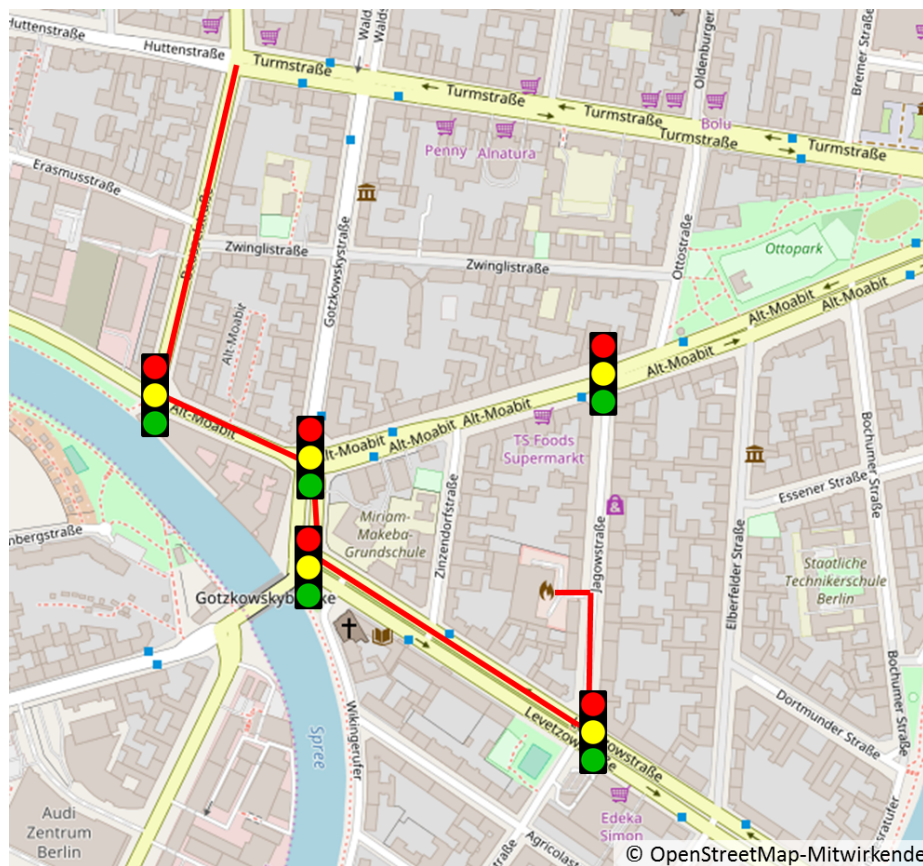


Abbildung 3.8: Route des Sondereinsatzfahrzeugs von der Feuerwache zum Einsatzort durch das Testgebiet
(Quelle: Eigene Darstellung mit © OpenStreetMap contributors)

Weiterhin wurde statisch festgelegt, welche Lichtsignalanlagen beeinflusst werden sollen. Diese Information wird später ebenso vom Router bereitgestellt. Innerhalb der Simulation wird sekundlich die Berechnung des Anmeldezeitpunkts gestartet. Dazu werden über TraCi die verbleibende Fahrzeit bis zum Erreichen der jeweiligen Lichtsignalanlagen, die aktuelle Umlaufsekunde und der aktuell laufende Signalzeitplan jeder LSA abgefragt. Außerdem wird ermittelt, wie viele Fahrzeuge momentan einen Rückstau vor den LSA bilden. Mit diesem Wert wird eine Zeitdauer berechnet, die für den Stauabbau benötigt wird. Diese Zeit fließt nun in die Berechnung des Schaltzeitpunktes mit ein. Sollte der Schaltzeitpunkt kleiner oder

gleich 0 sein, wird über TraCi der Umschaltvorgang in ein hinterlegtes Feuerwehrprogramm gestartet. Nachdem das Fahrzeug die LSA passiert hat, wird der Schaltbefehl zum Wechsel in den letzten Signalzeitplan gesendet.

```
Main [Java Application] C:\Program Files\Java\jdk8\bin\javaw.exe (29.05.2018, 11:00:09)
=====
LEGO ==> Time to TLS: 51 s
LEGO ==> Cars on TLS-Zufahrt: 3
LEGO ==> akt. System Buffer: 0 Calculated Buffer: 6 new Needed Buffer: 6
LEGO ==> Schalten in Sekunde: 39 Restzeit: 1s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +6) ==> bis FW-Plan: 0s ==> entstandener Systempuffer: 1s
AMKABE ==> Time to TLS: 78 s
AMKABE ==> Cars on TLS-Zufahrt: 0
AMKABE ==> akt. System Buffer: 0 Calculated Buffer: 0 new Needed Buffer: 0
AMKABE ==> Schalten in Sekunde: 61 Restzeit: 12s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +0) ==> bis FW-Plan: 10s ==> entstandener Systempuffer: 2s
LEJA ==> Time to TLS: 17 s
LEJA ==> Cars on TLS-Zufahrt: 0
LEJA ==> akt. System Buffer: 0 Calculated Buffer: 0 new Needed Buffer: 0
LEJA ==> Schalten in Sekunde: 4 Restzeit: 8s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +0) ==> bis FW-Plan: 2s ==> entstandener Systempuffer: 6s
GOAM ==> Time to TLS: 59 s
GOAM ==> Cars on TLS-Zufahrt: 2
GOAM ==> akt. System Buffer: 0 Calculated Buffer: 4 new Needed Buffer: 4
GOAM ==> Schalten in Sekunde: 50 Restzeit: 0s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +4) ==> bis FW-Plan: 0s ==> entstandener Systempuffer: 0s
=====
LEGO ==> Time to TLS: 42 s
LEGO ==> Cars on TLS-Zufahrt: 3
LEGO ==> akt. System Buffer: 1 Calculated Buffer: 6 new Needed Buffer: 5
LEGO ==> Schalten in Sekunde: 25 Restzeit: 7s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +5) ==> bis FW-Plan: 1s ==> entstandener Systempuffer: 6s
AMKABE ==> Time to TLS: 66 s
AMKABE ==> Cars on TLS-Zufahrt: 0
AMKABE ==> akt. System Buffer: 2 Calculated Buffer: 0 new Needed Buffer: 0
AMKABE ==> Schalten in Sekunde: 45 Restzeit: 16s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +0) ==> bis FW-Plan: 16s ==> entstandener Systempuffer: 0s
LEJA ==> Time to TLS: 13 s
LEJA ==> Cars on TLS-Zufahrt: 0
LEJA ==> akt. System Buffer: 6 Calculated Buffer: 0 new Needed Buffer: 0
LEJA ==> Schalten in Sekunde: 3 Restzeit: 5s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +0) ==> bis FW-Plan: 2s ==> entstandener Systempuffer: 3s
GOAM ==> Time to TLS: 50 s
GOAM ==> Cars on TLS-Zufahrt: 2
GOAM ==> akt. System Buffer: 0 Calculated Buffer: 4 new Needed Buffer: 4
GOAM ==> Schalten in Sekunde: 41 Restzeit: 0s (Sicherheitspuffer: +5) (Verkehr: +4) ==> bis FW-Plan: 0s ==> entstandener Systempuffer: 0s
=====
```

Abbildung 3.9: Ausgabewerte des Algorithmus zur Berechnung der Anmeldepunkte

3.5 Laborversuch

Um die bestimmten Anmeldezeitpunkte und die damit verbundenen berechneten Signallaufzeiten unter möglichst realen Bedingungen überprüfen zu können, wurden im LSA-Labor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mehrere Versuche durchgeführt. Der folgende Abschnitt gibt Aufschluss über den Versuchsaufbau und dessen Durchführung.

3.5.1 Versuchsaufbau

Im Labor ist ein LSA-Steuergerät der Firma SIEMENS Typ C 940 V [SIE] vorhanden (siehe Abbildung 3.10). Auf diesem wurde die Steuerung der LSA Levetzowstraße / Jagowstraße nachempfunden und versorgt. Am Steuergerät sind über den FUP-Platter potentialfreie Kontakte mit den Ein- und Ausgängen eines Industriecomputers des Herstellers Beckhoff Typ CX2040 verbunden (siehe rot markiertes Gerät in Abbildung 3.11). Der Industriecomputer dient zur externen Ansteuerung des LSA-Steuergeräts. Da diese meist sehr stark gekapselt aufgebaut sind, muss der Datenaustausch über das Lesen und Setzen von potentialfreien Kontakten stattfinden (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 3.12). Auf dem Industriecomputer läuft das Betriebssystem "Windows Embedded" sowie die Software „TwinCat 3 IO“ zur Steuerung der Ein- und Ausgänge. Für die Programmiersprache IronPython steht eine API zur Ansteuerung der TwinCat-Software zur Verfügung [Har09].

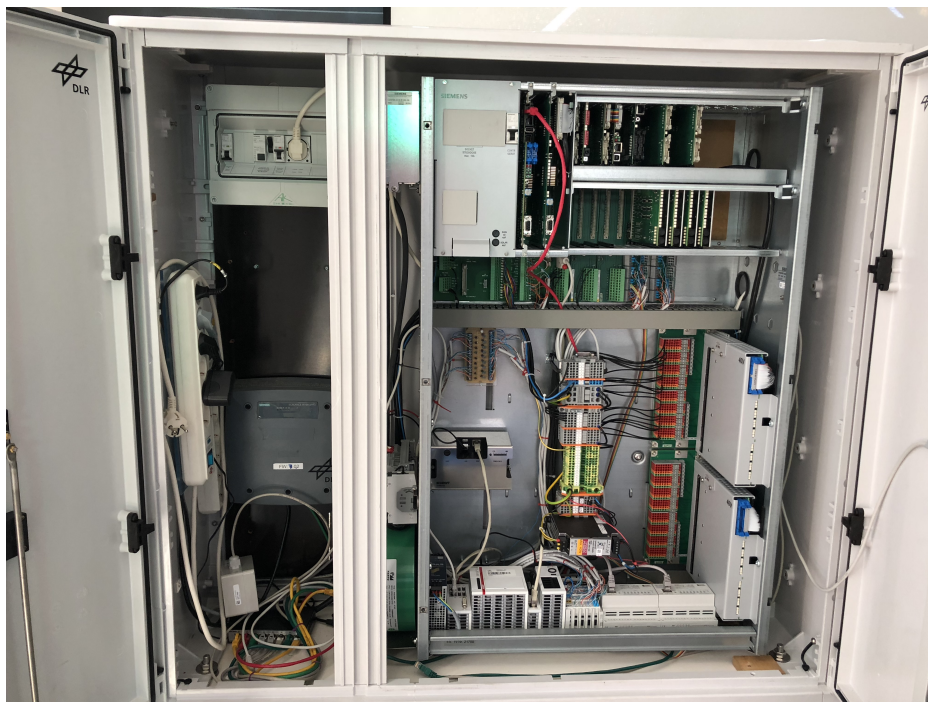


Abbildung 3.10: LSA Steuergerät - Firma SIEMENS AG
(Quelle: Eigene Darstellung)

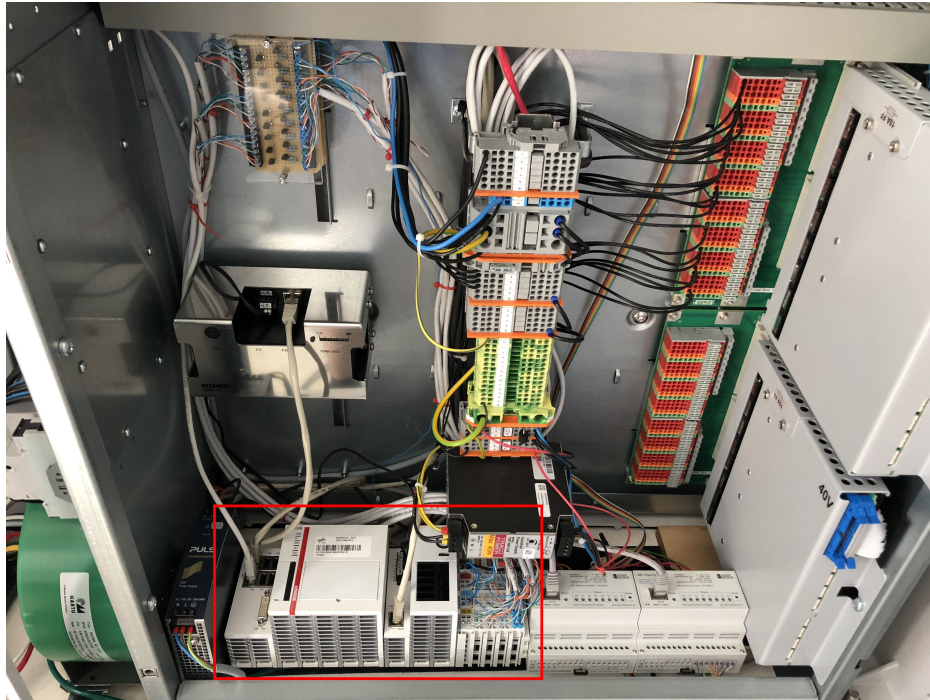


Abbildung 3.11: Zusätzliche Einbaugeräte im Labor: u.a. Beckhoff Industriecomputer mit I/O-Einheit (rot markiert)
(Quelle: Eigene Darstellung)

3.5.2 Ansteuerung LSA-Steuergerät

Zur Ansteuerung des LSA-Steuergeräts durch den Beckhoff-Industriecomputer wurde für erste Tests in der Programmiersprache IronPython eine Software entwickelt, die einen TCP-Socket zur Verfügung stellt und in der Lage war, eingehende Befehle an das LSA-Steuergerät weiter zu reichen (z.B. Start und Ende der Bevorrechtigung) sowie Ausgaben des Steuergeräts auszuwerten und über den Socket zur Verfügung zu stellen (aktueller Signalzeitplan, Umlaufzeittrigger, etc.). Zur Nutzung der TwinCat Ein- und Ausgänge musste zunächst in Visual Studio eine Art SPS-Programm entwickelt werden, das Variablen zur Verfügung stellt und diese mit entsprechenden Ein- und Ausgängen verbindet. Nachdem diese Verbindung hergestellt war, konnten die Ausgaben des Steuergeräts eingelesen werden. Das Einlesen der Umlaufzeit stellte jedoch ein größeres Problem dar. Da für 120 Sekunden Umlaufzeit mindestens sieben Bit, also auch sieben Drähte notwendig gewesen wären, wurde nach einer anderen Lösung gesucht.

Die Umlaufzeit wird nun im IronPython-Programm mittels einer Stoppuhr gemessen. In der LSA-Logik wurde dafür eine Anpassung gemacht, die in jedem Umlauf in Sekunde Null eine Quittungslampe aktiviert. Diese Quittungslampe wurde mit einem Eingang des Beckhoff Industriecomputers verknüpft und als Trigger-Signal für den Reset der Umlaufzeit-Stoppuhr genutzt. Bei der Nutzung dieses Verfahrens stellte sich in einem Test mit 1000 Umläufen jedoch heraus, dass es zu einer relativ konstanten Abweichung von 0,11 Sekunden pro Umlauf kam. Das heißt, dass bereits 0,11 Sekunden bevor man das Ende des Umlaufs an Sekunde 50

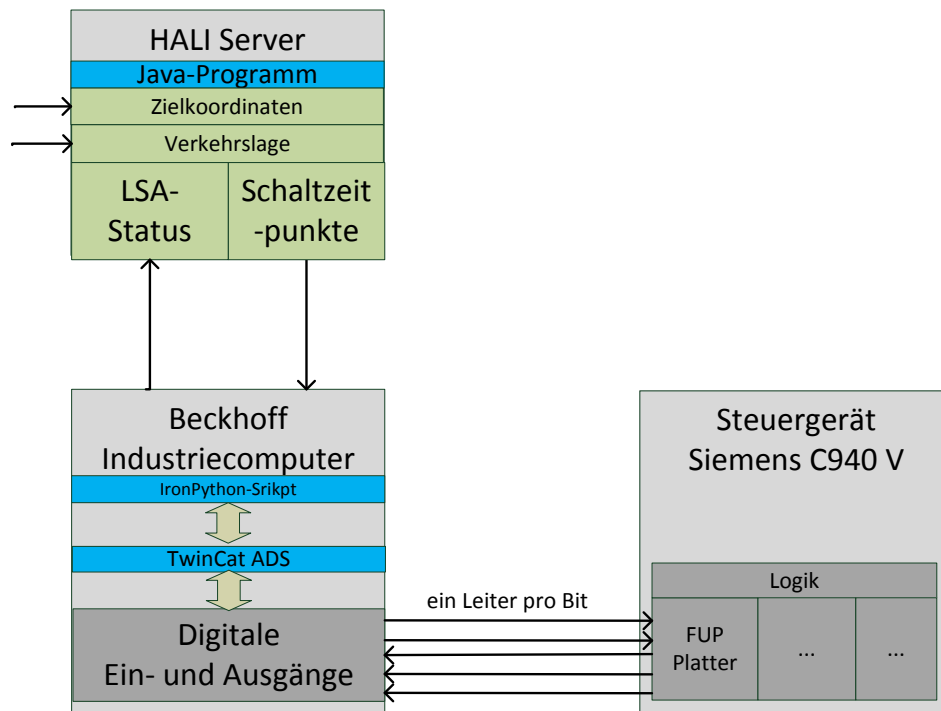


Abbildung 3.12: technischer Versuchsaufbau im LSA-Labor
(Quelle: Eigene Darstellung)

erreicht, erneut der Umlaufzeittrigger gesetzt wurde. Man muss davon ausgehen, dass diese Abweichung aufgrund von Latenzzeiten bei der Einschaltung der Quittungslampe und auch beim Einlesen der Eingänge am Beckhoff Industriecomputer zustande kommt.

Bei der Implementierung wird nun beim Start der Stoppuhr ein Parameter abgezogen, der mit 0,11 s festgelegt wurde. Weiterhin ist zu beachten, dass die Umlaufzeit immer ein ganzzahliger Wert ist und so bei der Rundung der berechneten Zeitdifferenz abgerundet werden muss. In einem 50 Sekunden Umlauf, der von 0,0 Sekunden bis 49,9 Sekunden gezählt wird, würde es sonst ab Sekunde 49,5 zur Ausgabe „Umlaufzeit: Sekunde 50“ kommen. Man spricht hier zwar von einer relativ kleinen Abweichung, gerade im Hinblick auf einen 50 Sekunden Umlauf wird man dies nicht zwangsläufig bemerken. Bei 90 Sekunden oder 120 Sekunden Umläufen hat es sich allerdings schon deutlich gezeigt, dass die Zeit voneinander abweicht. Man sieht daran besonders die Notwendigkeit, dass nicht nur zum Start des Programms einmalig eine Synchronisierung stattfindet, sondern in jedem Umlauf erneut.

3.5.3 Validierung der berechneten Schaltzeitpunkte

Um die Anmeldezeitpunkte auch mit einem realen Steuergerät überprüfen zu können, wurde das Java-Programm für die SUMO-Simulation um eine TCP-Schnittstelle zum Iron-Python-Programm (Kapitel 3.5.2), welches auf dem Beckhoff-Industriecomputer läuft, erweitert. Über diese Schnittstelle konnten nun sowohl die Umlaufzeit und der aktuelle Signalzeitplan

abgefragt, aber auch verschiedene Bevorrechtigungswünsche gesendet werden. Um eine gewisse Flexibilität zu erhalten, sendet das JAVA-Programm die Nummer des gewünschten Sondereingriffsplans. Das Iron-Python-Programm erhält über die Konfiguration die Information, welches Signalprogramm zu welchem Ausgang am Beckhoff-Industriecomputer gehört. Im Java-Programm muss ebenso die Konfiguration angepasst werden. Die ausgewählte Lichtsignalanlage erhält nicht nur, wie bei der SUMO-Simulation, einen Knotennamen, sondern auch eine IP-Adresse und einen Port. Bei einem ersten Test stellte sich jedoch heraus, dass es zu einer starken Abweichung zwischen den theoretisch berechneten und den in der Simulation überprüften Werten kam. Deshalb wurde zunächst ein Dauerversuch durchgeführt, der Aufschluss über die Art und Weise der Durchführung einer Bevorrechtigung in einem Siemens Steuergerät geben sollte.

Für diesen Versuch wurde ein weiteres Iron-Python-Skript entwickelt, das die Umlaufzeit des Steuergeräts abfragt und mittels einer Schleife zu jeder Umlaufsekunde eine Bevorrechtigung startet. Um messen zu können, wie lange es dauert, bis die Bevorrechtigung umgesetzt wird, musste im Steuergerät eine Quittungslampe definiert werden, die eine Ausgabe in den Beckhoff Industriecomputer leitet, sobald ein Detektor am Steuergerät (Start Sondereingriffsbevorrechtigung) gesetzt ist und eine Signalgruppe des Feuerwehrplans das Farbbild „Grün“ zeigt. Somit wurde zum Start der Bevorrechtigung ein Timer gestartet, der gestoppt wurde, sobald die Quittung vom Steuergerät einlief. Der ermittelte Wert wurde zusammen mit der Umlaufsekunde in eine Logdatei geschrieben. Dieser Wert stellt die praktisch ermittelte Dauer dar, die es benötigt, um in einer bestimmten Umlaufsekunde in einen Sondereingriffsplan zu schalten. Sobald die Quittung für die Bevorrechtigung angekommen war, wurde die Bevorrechtigung beendet. Nach einer Wartezeit von 90 Sekunden wurde dieser Test in der nächsten Umlaufsekunde gestartet. Parallel dazu wurde eine Signalplanvisualisierung mittels „SiTraffic Service“ aufgezeichnet. Die entstandene csv-Datei konnte ergänzend für die Auswertung verwendet werden.

4 Analyse und Auswertung

Bei der Simulation galt es zu analysieren, ob die Schaltzeitpunkte dahingehend optimal sind, dass alle LSA dem Sondereinsatzfahrzeug auf seiner Einsatzfahrt eine haltfreie Durchfahrt ermöglichen. Außerdem wurde die Reisezeit von der Feuerwehrrache zum Einsatzort (Kreuzung Turmstraße/Beusselstraße) ermittelt. Weiterhin wurde analysiert, inwieweit die beim Laborversuch ermittelten mit den berechneten Signallaufzeiten übereinstimmen. Besonders für den späteren Praxiseinsatz ist es von großer Bedeutung, dass die berechneten Werte der Wirklichkeit ähnlich sind.

4.1 Simulationsanalyse

Zur Analyse der Simulation wurde die Reisezeit zwischen Feuerwehrrache und Einsatzort stichprobenartig für fünf Einsatzstartzeiten erfasst. Da die Einsatzfahrten quasi Sonderereignisse sind, die nur aus einer Fahrt mit statischem Ziel bestehen, wurden nicht mehrere Versuche über längere Zeiträume durchgeführt. Dabei wurden fünf Uhrzeiten, beginnend ab 08:00:00 Uhr, zufällig ausgewählt. Das Feuerwehrrfahrzeug hat innerhalb der Simulation mittels der Parameter „setSpeedFactor = 1.5“ und „setSpeedMode = 1“ die Berechtigung zum Überschreiten der Geschwindigkeit und zum Überfahren von roten Lichtsignalanlagen bekommen. Dabei muss beachtet werden, dass das Sondereinsatzfahrzeug nicht in den Gegenverkehr fährt, auch wenn nur ein Fahrzeug vor einer roten LSA steht. Zur Auswertung wurden eine minimale Fahrzeit ohne Verkehr und mit grünen LSA sowie die Szenarien ohne und mit HALI-Steuerung aufgezeichnet (siehe Abbildung 4.1).

Bei der Auswertung dieser Werte konnte festgestellt werden, dass die durchschnittliche Reisezeit mit HALI-Strategie um fast 16 Sekunden kürzer war als ohne HALI-System. In Bezug zur durchschnittlichen Reisezeit ohne HALI-System mit einer Dauer von 95,8 Sekunden ist das eine Zeitersparnis von über 16 Prozent. An Abbildung 4.1 kann man sehr gut erkennen, dass nicht zu jeder Zeit eine Verbesserung erreicht werden kann. Gründe hierfür liegen in der hohen Verkehrsbelastung, aber auch an der Umlaufzeit und den damit verbundenen aktuellen Mindestfreigabe- und Zwischenzeiten, welche unbedingt eingehalten werden müssen.

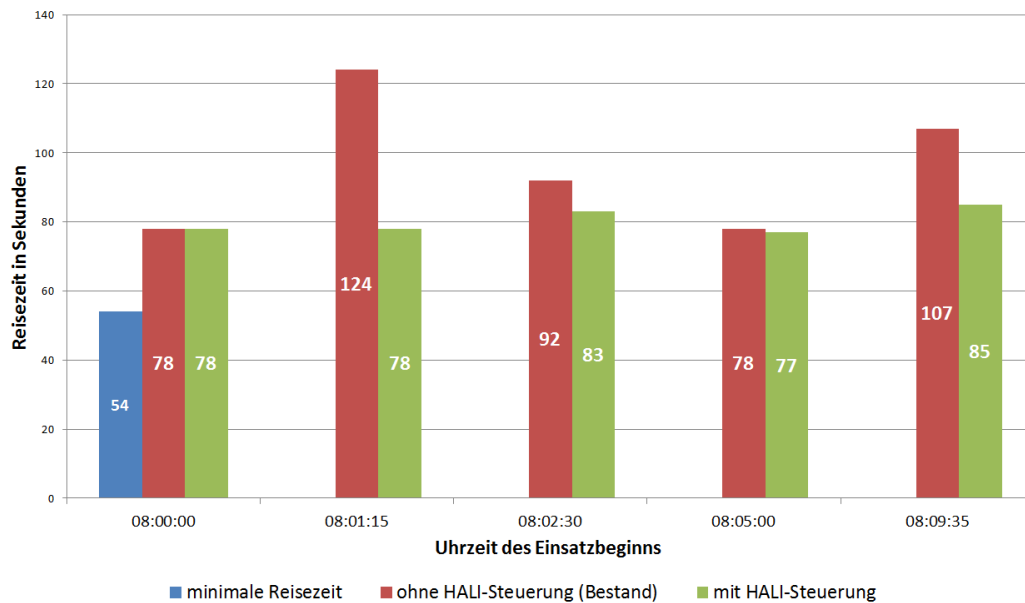


Abbildung 4.1: Vergleich der Reisezeiten zwischen Feuerwache und Einsatzort ohne und mit HALI-Strategie

Ob das Sondereinsatzfahrzeug im Rahmen der berechneten Schaltzeitpunkte bei „Grün“ die Kreuzung passiert und ob der eventuell vorhandene Rückstau dabei abgebaut war, wurde im Rahmen der Simulation visuell überprüft. Nachdem die Simulation gezeigt hatte, dass der erstellte Algorithmus funktioniert, wurde mit dem Test am Steuergerät SIEMENS C940V begonnen.

4.2 Analyse und Auswertung der technischen Gegebenheiten

Zur Ansteuerung des realen Steuergeräts waren mehrere Hard- und Softwarekomponenten notwendig. Zur Hardware zählen das Steuergerät, eine Ein- und Ausgabeeinheit, ein Industriecomputer und ein Server zur Steuerung. Softwareseitig mussten Anpassungen im Steuergerät vorgenommen werden. Es musste ein Programm zum Auslesen und Setzen der Aus- und Eingänge, ein Python-Skript zur Entgegennahme von Schaltbefehlen und Abfragen des Steuergeräts sowie ein Programm zur Berechnung der Schaltzeitpunkte und Ausgabe der Schaltbefehle geschrieben werden. Aufgrund dieser Vielzahl an Komponenten war eine große Fehler- und Störquote zu befürchten. Dazu kommen gewisse Latenzzeiten, die alle beteiligten Systeme aufweisen, und sich unter Umständen sogar gegenseitig vervielfachen können. Die Übertragung des aktuellen Signalzeitplans stellte kein großes Hindernis dar, dieser wechselt auch nur sehr selten. Die einzige Schwierigkeit bestand darin, den aktuellen Signalzeitplan in der Logik des Steuergeräts binär kodiert auf Ausgänge zu legen und diese im Industriecomputer wieder binär einzulesen und umzuwandeln. Die Übermittlung der aktuellen Umlaufsekunde ins Steuergerät erwies sich als wesentlich komplizierter. Der Plan war hierbei, dass im Industriecomputer in jedem Umlauf zur Umlaufsekunde 0 ein Timer

gestartet, bzw. zurückgesetzt werden soll und die Zeit so parallel zum Steuergerät erfasst wird. Leider zeigte sich bei 70 Sekunden bzw. 90 Sekunden Umläufen, dass es zum Teil gegen Ende zu Zeitunterschieden kam. Deshalb war es notwendig, dass zunächst ein Versuch gestartet wird, der das Ziel hatte, zu ermitteln, wie groß der Zeitunterschied zwischen Steuergerät und Industriecomputer ist. Dabei wurde festgestellt, dass es eine Latenzzeit von ca. 0,11 s gibt. Diese kann zum Beispiel durch die Vielzahl an Schnittstellen und Programmen entstanden sein, die zur Übermittlung der Informationen zwischen Steuergerät und Beckhoff-Industriecomputer notwendig sind.

4.3 Analyse und Auswertung der ermittelten Signallaufzeiten

Nachdem die Umlaufzeit im Industriecomputer synchron zum Steuergerät erfasst wurde, konnte der eigentliche Laborversuch begonnen werden. Über ein IronPython-Programm wurde die Zeitdauer gemessen, die das Steuergerät benötigt, um von einem normalen Signalzeitplan in einen Sondereingriffsplan zu schalten. Dazu wurde im Bestandsfeuerwehrplan eine Dummy-Signalgruppe angelegt, welche mit einer Quittungslampe verknüpft wurde. Dabei musste festgestellt werden, dass das Steuergerät im Rahmen der Zwischen- und Mindestfreigabezeiten den Wechsel in den Feuerwehrplan nicht wie vermutet über „alles rot“ durchführt sondern die Signalgruppen einzeln im Rahmen der genannten Zeiten auf „rot“, bzw. „grün“ schaltet. Somit wurde das Quittungssignal immer erst empfangen, sobald auch die Dummy-Signalgruppe zugeschaltet wurde, die in den normalen Programmen keine Freigabe hatte, obwohl alle anderen Signalgruppen des Feuerwehrplans bereits „grün“ zeigten. Diese Umsetzung ist anhand der Auswertung der Signalplanvisualisierung in Tabelle 4.1 für den Start der Bevorrechtigung in Umlaufsekunde 28 ersichtlich. Die berechnete Dauer betrug 0 Sekunden, da sich die maßgebende Signalgruppe SG2 bereits in der Freigabe befand. Gemessen wurde dafür jedoch ein Wert von 4 Sekunden. An der Abbildung kann man sehr gut erkennen, dass dieser Zeitunterschied aufgrund der späteren Zuschaltung der Dummy-Signalgruppe SG9 zustande kommt. Weiterhin kann man an diesem Beispiel gut erkennen, dass die Signalgruppe SG4 nach ihrer Mindestfreigabezeit (8 Sekunden) abgebrochen wird. Insgesamt führte dieses Vorgehen jedoch nicht zum gewünschten Erfolg.

Deshalb wurde die Dummy-Signalgruppe wieder entfernt und im Steuergerät eine Quittungslampe für das Farbbild „grün“ der Signalgruppe des Feuerwehrplans in Verbindung mit einem Detektoreingang geschaltet. Der Detektoreingang stellt dabei die Anforderung des Feuerwehrplans seitens des Industriecomputers dar. Hiermit konnten die im vorhergehend beschriebenen Verfahren entstandenen Versatzzeiten verhindert und somit auch eine Auswertung gemacht werden, wie groß die Signallaufzeiten sind. Wie in der aufgezeichneten Signalplanvisualisierung (Tabelle 4.2) ersichtlich ist, wurde in Umlaufsekunde 6 der Sondereingriff am Steuergerät gestartet. Nach drei Sekunden beginnt das Steuergerät den Umschaltvorgang in den Sondereingriffsplan 2. Dabei sieht man sehr gut, dass die Fußgänger-Signalgruppen 11 und 12 sowie 14 und 15 sofort abgebrochen werden, da die Mindestfreigabezeit abgelaufen ist.

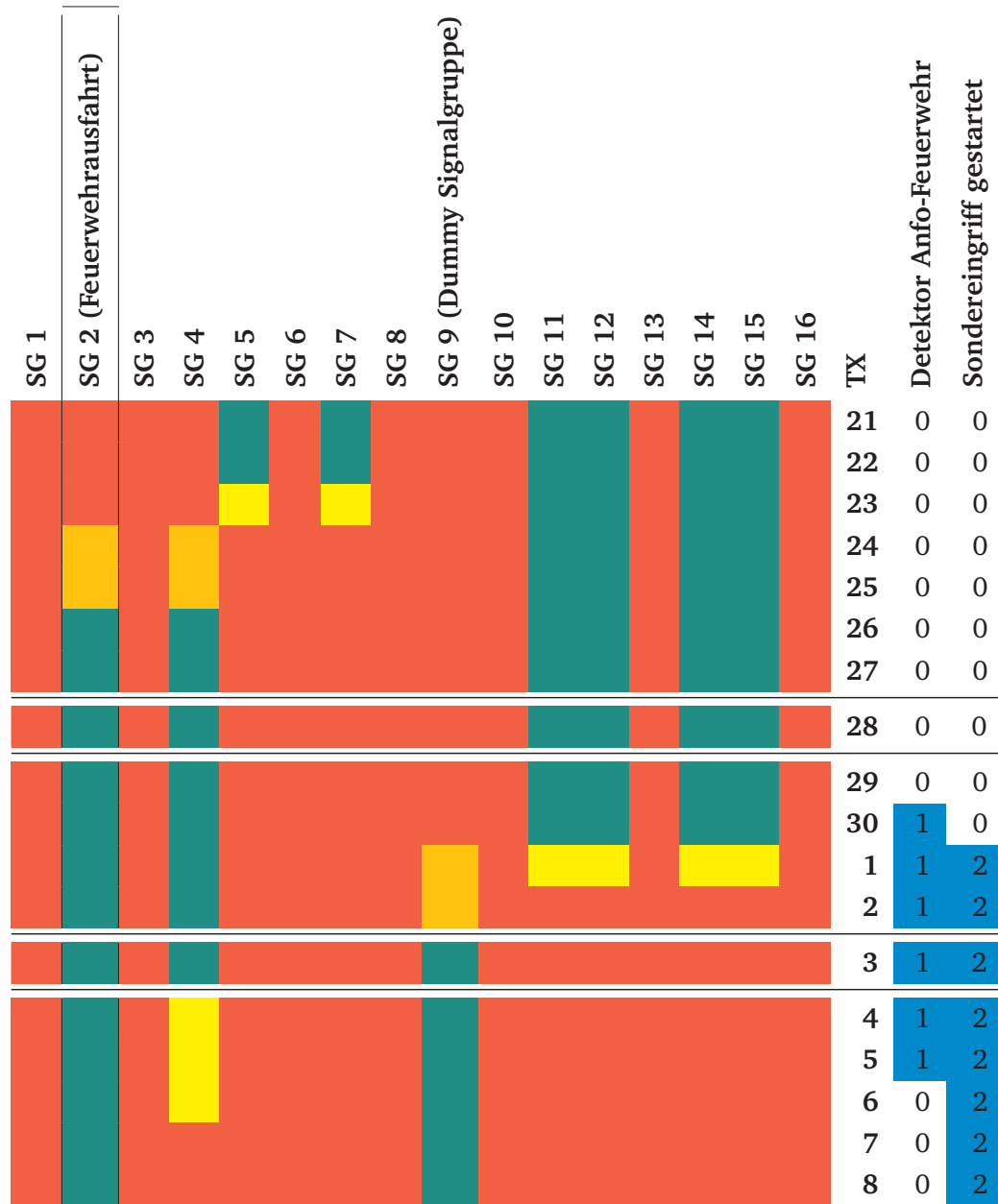


Tabelle 4.1: Mitschnitt der Signalplanvisualisierung: Start eines Sondereingriffs mit Dummy-Signalgruppe

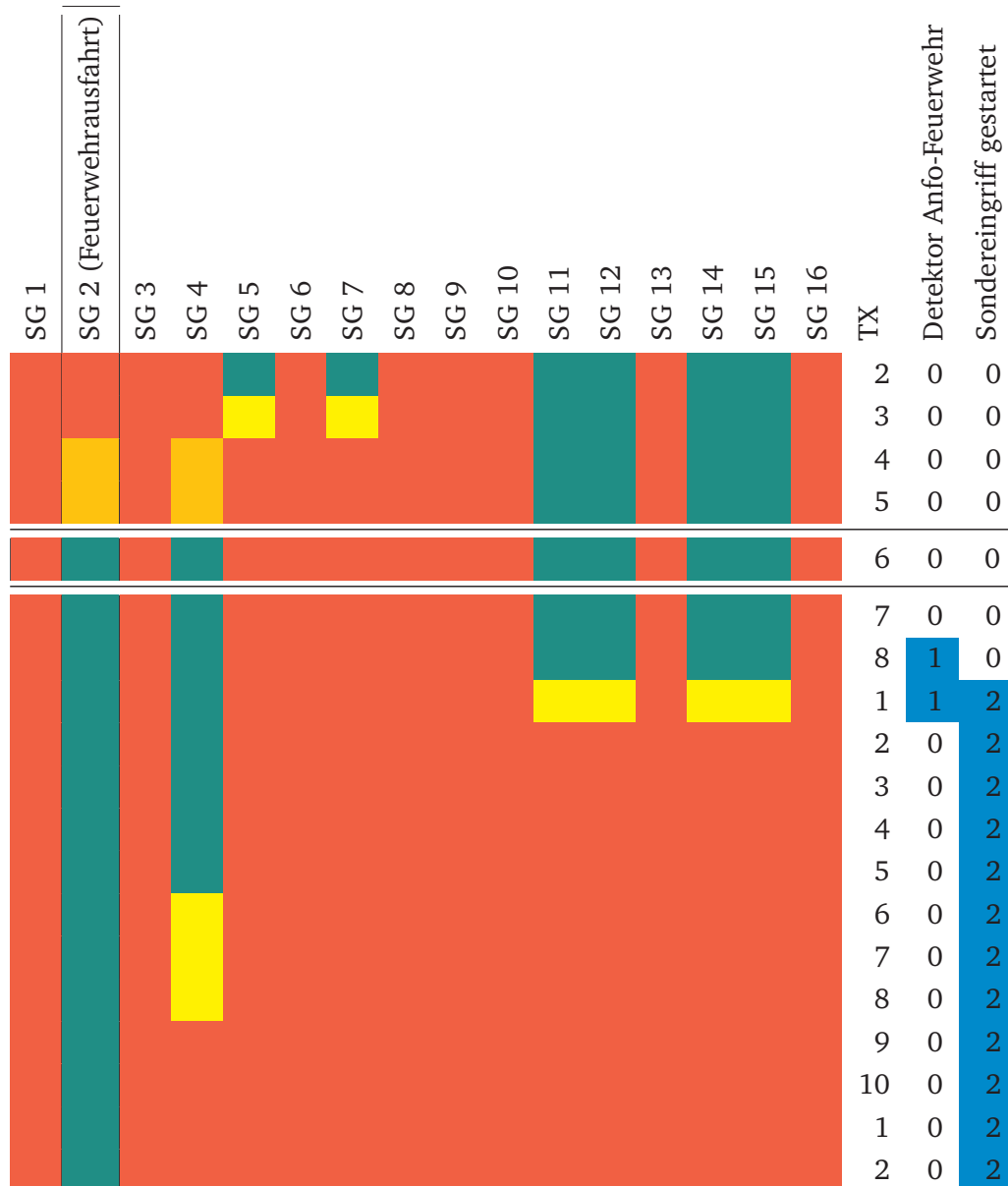


Tabelle 4.2: Mitschnitt der Signalplanvisualisierung: Start eines Sondereingriffs ohne Dummy-Signalgruppe

4.4 Vergleich der berechneten und gemessenen Signallaufzeiten

In der Folge wurden die berechneten mit den gemessenen Signallaufzeiten verglichen, um eventuelle Vorlaufzeiten identifizieren zu können. Zum Vergleich der beiden Zeiten wurde die Differenz gebildet. In einigen Umlaufsekunden gab es besonders große Differenzen, die auffällig erschienen. Besonders in den Sekunden 20 bis 23 gab es mit 15,4 Sekunden Unterschied eine deutliche Abweichung beider Werte. Eine Auswertung mit Hilfe der aufgezzeichneten Signalplanvisualisierung zeigte, dass erst zwei Sekunden nachdem der Beckhoff-Industriecomputer das Signal zum Schalten eines Sondereingriffs abgesendet hatte, auch das Steuergerät diesen Eingang erkannt hatte. Nach einer weiteren Sekunde startete das Steuergerät den hinterlegten Sondereingriffsplan. Um die Zeitdifferenz genauer bestimmen zu können, wurden die berechneten Signallaufzeiten wie in Abbildung 4.2 dargestellt, bei der Auswertung um ein Offset von 3 Sekunden verschoben. Ein Vergleich der Standardabweichung zeigte, dass diese von 3,7 auf 1,7 verringert werden konnte. Ein Grund für diese Versatzzeit könnte die fehlerhafte Synchronisierung der Umlaufzeiten sein.



Abbildung 4.2: Ermittelte Differenzen zwischen berechneten und ermittelten Signallaufzeiten mit und ohne Offset

Ein weiterer interessanter Punkt war die Analyse der eigentlichen Signallaufzeiten. Hierbei zeigte sich, dass wenn die maßgebende Signalgruppe des Feuerwehrplans bereits zum Start des Sondereingriffs „grün“ zeigt, die Quittung durch die Quittungslampe im Beckhoff-Industriecomputer bereits nach 0,3 Sekunden registriert wurde. Die Annahme, dass eingehende Detektoranforderungen nur innerhalb des sonst im Steuergerät üblichen 1-Sekunden-Rhythmus bearbeitet werden, bestätigte sich deshalb nicht. Die Signalplanvisualisierung, deren Ausgabe auf eine Sekunde genau ist, zeigt hingegen auch in diesem Fall einen Versatz

von zwei Sekunden zum Erhalt der Detektoranforderung sowie eine weitere Sekunde Versatz zum Start des Sondereingriffs.

4.5 Analyse zu auftretenden Latenzen bei der Datenübertragung

Wie bereits in den beiden vorangehenden Kapiteln erläutert, wurde schon in der Laborumgebung festgestellt, dass man zum Teil mit erheblichen Latenzzeiten bei der Übertragung zwischen LSA-Steuergerät, Beckhoff-Industriecomputer und HALI-Server rechnen muss. Da die Schnittstellen der einzelnen Komponenten, wie On-Board-Unit und LSA-Ansteuerung, im Projekt „HALI Berlin“ über Mobilfunkverbindungen ausgeführt werden sollen, muss von vornherein mit noch größeren Latenzen gerechnet werden. In diesem Zusammenhang hat Florian Tornack innerhalb seiner Bachelorarbeit [Tor17] Versuche im LSA-Labor durchgeführt. Er hat eine Position mit einem Android-Smartphone bestimmt und diese Position bei jeder Änderung über ein VPN-Netzwerk via Mobilfunk an einen Industrie-PC im LSA-Labor gesendet. Durch die Zeitdifferenz zwischen Sendung und Empfang der Nachricht hat er auf die Latenzzeit geschlossen.

Der Versuch wurde jeweils eine Stunde lang von 3 verschiedenen Orten in Berlin durchgeführt. Diese Orte sollten möglichst unterschiedliche Gegebenheiten präsentieren. Die Aussendungen wurden zum Beispiel vom Berliner Alexanderplatz mit einer besonders hohen Personendichte und Bebauung und vom Landschaftspark Johannisthal/Adlershof mit geringer Personendichte und Bebauung durchgeführt. Das Ergebnis seiner Arbeit war, dass sich die Latenzzeit auf ungefähr eine Sekunde einschwingt. Diese muss bei der Anmeldung an den Lichtsignalanlagen berücksichtigt werden. Wiederum hat er auch herausgefunden, dass diese Latenzzeit jedoch auch wesentlich geringer oder höher sein kann. Wenn zum Beispiel sehr viele Sendemasten zur Verfügung stehen, ist es möglich, dass die Anfragen sehr schnell bearbeitet werden können. Für die Umsetzung im HALI-Testgebiet wird jedoch zunächst mit einer Sekunde gearbeitet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung eines Verfahrens zur Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen. Dabei wird insbesondere Wert auf die Bestimmung des optimalen Anmeldezeitpunkts an der Lichtsignalanlage und auf den Vorgang der eigentlichen Anmeldung gelegt. Zur Validierung der berechneten Punkte werden die Verkehrsmikrosimulationssoftware SUMO eingesetzt sowie mehrere Laborversuche an realen LSA-Steuergeräten durchgeführt. Zu Beginn der Arbeit wird zunächst betrachtet, warum Bevorrechtigungssysteme für Sondereinsatzfahrzeuge sinnvoll sind. Außerdem werden ausgewählte Bestandssysteme mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt. Die Entwicklung dieser Systeme reicht schon weit über 30 Jahre zurück. Dementsprechend gibt es auch genügend Potential mittels Forschung, Verbesserungen herbeizuführen. Innerhalb des Projekts „HALI Berlin“, an dem sich das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. beteiligt, soll deshalb ein neues Verfahren angewendet werden, das in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage eine punktgenaue Bevorrechtigung einleiten kann.

Dazu wird im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept mit 4 Arbeitsschritten entwickelt. Für die Auslösung einer Bevorrechtigung ist es zunächst wichtig zu wissen, wie lange der Umschaltvorgang von einem normalen Signalzeitplan in einen Sondereingriffsplan dauert. Die Berechnung der so genannten Signallaufzeiten wird in Kapitel 3.2 genau erläutert. In einem weiteren Schritt wird der eigentliche Schaltzeitpunkt unter anderem mit Hilfe der berechneten Signallaufzeiten bestimmt. Diese Umsetzung innerhalb eines Algorithmus wird in Kapitel 3.3.1 genau beschrieben. Zur Verbesserung des Verfahrens werden Rückstaulängen vor der LSA in den Algorithmus mit einbezogen. Damit wird eine wesentlich präzisere Aussage über den Schaltzeitpunkt getroffen.

Die Validierung dieser Schaltzeitpunkte wird in ersten Linie mit der Verkehrsmikrosimulationssoftware SUMO durchgeführt. Dafür wird ein Simulationsszenario entwickelt, welches das Testgebiet des Projekts „HALI Berlin“ im Berliner Stadtbereich Moabit zeigt. Für eine möglichst realitätsgetreue Simulation werden neben dem Verkehrsnetz auch Signalzeitpläne und Verkehrsdaten des Untersuchungsgebiets in die Simulationsumgebung überführt. Nachdem mit Hilfe der Simulation bewiesen werden konnte, dass der Berechnungsalgorithmus funktioniert, konnte der Laborversuch im LSA-Labor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. am Standort Berlin-Adlershof starten. Dieser Schritt ist ein wesentlicher Bestandteil zur späteren Nutzung in der Praxis.

Um im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage erstellen zu können, wurde gleich zu Anfang festgestellt, dass einige Sachverhalte keine Berücksichtigung

finden können. Auf diese soll nun in Form eines Ausblicks eingegangen werden.

Im HALI Testgebiet gibt es derzeit kaum nutzbare Verkehrsinformationen wie Schleifen oder TrafficEyeUnits. Zum einen wird man die Verkehrslage auf Basis von Schätzungen mittels Taxi-FCD-Daten ermitteln können [Neu11]. Außerdem wurde ein Konzept entwickelt, das auf Basis der maximalen Aufstellfläche und der Tagesganglinie der vorhandenen Handzählraten einen Rückschluss auf den aktuellen Rückstau vor jeder LSA zulassen soll. Mit Hilfe der maximalen Aufstellfläche kann über die mittlere Fahrzeuglänge [For15] ermittelt werden, wie viele Fahrzeuge sich maximal vor der LSA aufhalten können. Da nicht zu jeder Tageszeit eine komplette Vorstauung vorhanden ist, man jedoch zur Spitzenstunde damit rechnen kann, ist es möglich, die maximale Fahrzeuganzahl über den Tagesgang der vorhandenen Handzählraten zu normieren. Das Verfahren müsste jedoch noch genauer untersucht und simuliert werden. In diesem Zusammenhang müsste auch der Modal Split betrachtet werden, da sich dieser auf die durchschnittliche Fahrzeuglänge auswirkt. Auch in der Simulation wurde bisher die Aufteilung des Verkehrs auf die verschiedenen Verkehrsmittel vernachlässigt.

Das innerhalb dieser Arbeit entwickelte Verfahren ist ausschließlich für Lichtsignalanlagen mit Festzeitsteuerung gedacht. Da im Testgebiet in Berlin Moabit an vier der fünf Anlagen ausschließlich Festzeitsteuerungen laufen, stellte dies kein Problem dar. Um unabhängig von der Steuerungsart zu sein, wäre es allerdings wichtig, auch für teil- und vollverkehrsabhängige Steuerungen einen Algorithmus zu entwickeln. Da alle Anlagen im Projekt vom Hersteller SIEMENS AG sind, lag ein besonderes Augenmerk auch auf die Verwendung von Feuerwehrläufen und deren Aktivierungsverhalten. Für die weitere Projektdurchführung sollte auch angestrebt werden, dass das Verfahren um eine Herstellerunabhängigkeit erweitert wird. Auch die Nutzung von Sondereingriffsphasen innerhalb der Logik einer verkehrsabhängigen Steuerung sollte betrachtet werden.

Eine weitere spannende Fragestellung ist, wie sich das System verhalten soll, wenn mehrere Fahrzeuge mit Bevorrechtigungssystem zur gleichen Zeit an einer LSA eintreffen werden. Besondere Schwierigkeit dabei ist, dass es für Feuerwehr und Polizei jeweils eine eigene Leitstelle gibt, welche mit unterschiedlichen Systemen arbeiten. Momentan werden bei den Einsätzen keine Prioritäten vergeben, die eine Rangfolge vorgeben würden. Die Berechnung des Anmeldezeitpunkts ist zwar für jedes Fahrzeug gleich, allerdings verändert ein Sondereingriff den normalen Ablauf der LSA. Für eine Mehrfachanmeldung müsste gesondert analysiert werden, wie sich eine LSA vor, während und nach einem Sondereingriff verhält. Dieses Verhalten müsste bei der Berechnung weiterer Signallaufzeiten berücksichtigt werden. Wesentlicher Bestandteil ist allerdings die Zeit, wie lange der Sondereingriffsplan am Haltepunkt stehen bleibt. Diese Zeit ist abhängig von der Ankunft bzw. der Abmeldung des SEF. Außerdem sollte in Zukunft in die Berechnung der Signallaufzeit auch der Wechsel der Signalzeitpläne mit einbezogen werden. Für die stadtweite und übertragbare Nutzung des Bevorrechtigungssystems müssen für diese Herausforderungen noch Lösungen gefunden werden.

Literatur

- [Bäk14] B. BÄKER und T. U. D. F. V. F. LIST: *Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA2014): 2. Projektphase; Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen ; Abschlussbericht; Projektlaufzeit: 01.04.2012-30.08.2014*. 2014. URL: <https://books.google.de/books?id=vYJEAQAACAAJ>.
- [Beh11] M. BEHRISCH, L. BIEKER, J. ERDMANN und D. KRAJZEWICZ: "SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview". In: *SIMUL 2011*. Hrsg. von S. Ü. of OSLO AIDA OMEROVIC, R. I. .-. R. T. P. D. A. SIMONI und R. I. .-. R. T. P. G. BOBASHEV. ThinkMind, Okt. 2011. URL: <http://elib.dlr.de/71460/>.
- [Boc07] S. BOCKTING: "Verkehrsunfallanalyse bei der Nutzung von Sonder- und Wegerechten gemäß StVO". In: *Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege – BGW* (2007). URL: www.forum-lra.de/index.php/downloads/category/12-rechtsfragen?download=128:verkehrsunfallanalyse-bei-der-nutzung-von-sonder-und-wegerechten-gemaess-stvo.
- [Bun14] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Pressemitteilung - 044/2014: Verkehrsprognose 2030: Verkehr wird deutlich zunehmen*. Juni 2014.
- [Bun16] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Verkehr und Mobilität in Deutschland - Daten und Fakten kompakt -*. Juli 2016.
- [Dit11] C. DITTRICH und F. BUSCH: "Rückstaulängenschätzung zur verbesserten Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug". de. In: *HEUREKA'11, Stuttgart*. 2011. ISBN: 978-3-941790-72-8. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1081272/1081272.pdf>.
- [For15] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN. ARBEITSAUSSCHUSS VERKEHRSBEEINFLUSSUNG INNERORTS: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA ; Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*. FGSV. FGSV-Verlag, 2015. URL: <https://books.google.de/books?id=pHMccgAACAAJ>.
- [Glo18] GLOBAL TRAFFIC TECHNOLOGIES: *Global Traffic Technologies - INDUSTRY*. Englisch. 2018. URL: <http://www.gtt.com/opticom-emergency-response/>.
- [Gre18] GREENWAYSYSTEMS GMBH: *GreenwaySystems - Produkte - Traffic Green*. 2018. URL: <https://www.greenwaysystems.de/web/?content=produkte&site=green>.

- [Har09] A. HARRIS: *Pro IronPython*. Expert's Voice in .NET. Apress, 2009. URL: <https://books.google.de/books?id=izFShORshFQC>.
- [Kat17] H. KATHS: *Kooperative Lichtsignalsteuerung: Integration von Fahrzeugen in die Steuerung vernetzter Verkehrssysteme*. Technische Universität München, 2017. URL: <https://books.google.de/books?id=ZZnDtQEACAAJ>.
- [Kou11] E. KOUKOU MIDIS, L.-S. PEH und M. R. MARTONOSI: "SignalGuru: Leveraging Mobile Phones for Collaborative Traffic Signal Schedule Advisory". In: *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. MobiSys '11. Bethesda, Maryland, USA: ACM, 2011, S. 127–140. ISBN: 978-1-4503-0643-0. DOI: 10.1145/1999995.2000008. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1999995.2000008>.
- [Kri14] P. D.-I. J. KRIMMLING: "Innovative Aspekte zur kooperativen Lichtsignalsteuerung mittels MIV und ÖPNV". In: *Braunschweiger Verkehrskolloquium*. 2014.
- [Kru14] M. KRUMNOW: "Sumo as a Service - Building up a Web Service to Interact with SUMO". In: *SUMO*. 2014.
- [Neu11] T. NEUMANN: "Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten". Diss. Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, 2011. URL: <https://elib.dlr.de/66672/>.
- [Pro14] V. PROTSCHKY, K. WIESNER und S. FEIT: "Adaptive traffic light prediction via Kalman filtering". In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2014*. 2014, S. 151–157. DOI: 10.1109/IVS.2014.6856394.
- [Rot89] R. ROTHE, H. KADNER und H. KUNTZE: *Strassenverkehrs-Ordnung, StVO und Strassenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, StVZO: mit Durchführungsbestimmungen : Textausgabe mit Sachregister*. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1989. ISBN: 9783329005116. URL: <https://books.google.de/books?id=mIqbAAAAMAAJ>.
- [Sch97] W. SCHNABEL und D. LOHSE: *Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Verkehrstechnik / unter Mitarb. von Lothar Lätsch Bd. 1. Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Verlag für Bauwissen, 1997. ISBN: 9783345005664. URL: <https://books.google.de/books?id=4gWW5AuOSkAC>.
- [SIE] SIEMENS AG: *SITRAFFIC C800V - Gerätetechnik - Handbuch*.
- [SIE14] SIEMENS AG: "Vorfahrt für die Feuerwehr! Satellitengestützte Bevorrechtigung Sitraffic Stream". In: *siemens.de/mobility* (2014). URL: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/road-solutions/urban/infrastructure/sitraffic-stream-fire-brigades-de.pdf>.

-
- [Stü17] STÜHRENBERG GMBH: “Verkehrssteuerungs- und Überwachungstechnik”. In: *moderne Straßenverkehrstechnik - Stührenberg* (2017).
- [Tor17] F. TORNACK: “Untersuchung und Umsetzung einer Einsatzfahrzeugbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen über Mobilfunk”. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim, Sep. 2017. URL: <https://elib.dlr.de/118430/>.
- [Ull07] C. ULLENBOOM: *Java ist auch eine Insel*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Bonn: Galileo Computing, 2007. URL: <http://www.galileocomputing.de/openbook/javainsel6/>.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Studienarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Dresden, den 21. Juni 2018

Anhang

Verzeichnis der Anhänge

A	Gesprächsprotokoll Greenwaysystems Frankfurt/Oder	A - 3
B	Tabelle: Signallaufzeiten	A - 5
C	Tabelle: Vergleich der berechneten und gemessenen Signallaufzeit	A - 7

A Gesprächsprotokoll Greenwaysystems Frankfurt/Oder

Datum: 15.05.2018

Uhrzeit: 10:00 - 13:00 Uhr

Ort: Frankfurt-Oder

Teilnehmer: Dr. Michael Maaser (Leiter IT), Willi Schmidt

- erste Entwicklung ab 1996
- eingeführt in Frankfurt/Oder (35 LSA) und Ingolstadt
- weitere Planungen für Georgsmarienhütte, Frankfurt am Main, Stralsund und Chemnitz durchgeführt, aber nicht umgesetzt
- Fahrzeuge werden mit Funkgerät und Recheneinheit mit GPS ausgestattet (enthält eine digitale Karte mit verorteten LSA)
- Lichtsignalanlagen werden mit Funkgerät und Recheneinheit ausgestattet, dazu weiterer Schaltschrank notwendig, da die Einheiten nicht mit im Steuergeräteschrank verbaut werden dürfen (siehe Bild A.1)
- Funkübertragung findet mit 1W im 70-cm Band statt (deutschlandweite Betriebsfunkt看enz)
- Aktivierung über Schalter für Blaulicht
- Fahrzeug identifiziert auf der Einsatzfahrt selbstständig die nächsten LSA und sendet eine Voranmeldung/Hauptanmeldung + Richtung, aus der es kommt
- VAN/HAN-Punkt liegen ca. 300-500 Meter vor der Haltelinie (keine dynamische Anpassung aufgrund der Verkehrslage)
- Schaltung von potentialfreien Kontakten zum Steuergerät der LSA und damit Auslösung einer Dreiseitensperrung
- Logikanpassung bzw. Erstellung eines Sondereingriffsplans obliegt der Stadt
- Abmeldung wird auf Kreuzungsmitte gesendet
- Anlagen von SIEMENS, Stührenberg und Swarco ausgerüstet

- „Jede Stadt ist anders“, insbesondere Beachtung von Rückstau bei der Planung der VAN/HAN/AB-Punkte

Im Anschluss folgte eine Probefahrt durch die Stadt Frankfurt/Oder.



Abbildung A.1: Geräte zur Ansteuerung eines LSA-Steuergeräts
(Quelle: Eigene Darstellung)

B Tabelle: Signallaufzeiten

Umlaufsekunde	Sekunden bis zum Feuerwehrplan
0	0
1	0
2	0
3	2
4	1
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	13
24	12
25	11

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Umlaufsekunde	Sekunden bis zum Feuerwehrplan
26	18
27	17
28	16
29	15
30	14
31	13
32	12
33	11
34	10
35	10
36	10
37	10
38	10
39	10
40	10
41	9
42	8
43	7
44	6
45	5
46	4
47	3
48	2
49	1

Tabelle B.1: Signallaufzeiten von SZPL 02 Levetzowstraße / Jagowstraße
zur Feuerwehrfreigabe aus Richtung Norden SZPL 10

C Tabelle: Vergleich der berechneten und gemessenen Signallaufzeit

tx	Messung Signallaufzeit	Berechnung Signallaufzeit	Differenz
0	5	0	5,00
1	4	0	4,00
2	3	0	3,00
3	2	2	0,00
4	1	1	0,00
5	1	0	1,00
6	0	0	0,00
7	0	0	0,00
8	0	0	0,00
9	0	0	0,00
10	0	0	0,00
11	0	0	0,00
12	0	0	0,00
13	0	0	0,00
14	0	0	0,00
15	0	0	0,00
16	0	0	0,00
17	6	0	6,00
18	4	0	4,00
19	4	0	4,00
20	15	0	15,00
21	14	0	14,00
22	13	0	13,00
23	14	13	1,00
24	17	12	5,00
25	19	11	8,00

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

C Tabelle: Vergleich der berechneten und gemessenen Signallaufzeit

tx	Messung Signallaufzeit	Berechnung Signallaufzeit	Differenz
26	18	18	0,00
27	17	17	0,00
28	16	16	0,00
29	15	15	0,00
30	14	14	0,00
31	13	13	0,00
32	13	12	1,00
33	12	11	1,00
34	13	10	3,00
35	12	10	2,00
36	12	10	2,00
37	12	10	2,00
38	11	10	1,00
39	10	10	0,00
40	9	10	-1,00
41	9	9	0,00
42	7	8	-1,00
43	6	7	-1,00
44	6	6	0,00
45	4	5	-1,00
46	4	4	0,00
47	4	3	1,00
48	4	2	2,00
49	4	1	3,00

Tabelle C.1: Vergleich der berechneten mit der gemessenen Signallaufzeit